

**VŠB – Technická univerzita Ostrava**

**Fakulta strojní**

**Katedra mechaniky**

**Analýza rozběhu mlecího kola elektrárny**

**The Power Plant Mill Wheel Run-up Analysis**

Student:

Vít Běhálek

Vedoucí bakalářské práce:

doc. Ing. Jiří Podešva, Ph.D.

Ostrava 2012

## Zadání bakalářské práce

Student:

**Vít Běhálek**

Studijní program:

B2341 Strojírenství

Studijní obor:

3901R003 Aplikovaná mechanika

Téma:

**Analýza rozběhu mlecího kola elektrárny.  
The Power Plant Mill Wheel Run-up Analysis.**

Zásady pro vypracování:

1. Úvod - popis technologie
2. Popis soustavy pohonu mlecího kola
3. Rozběh naprázdno - výpočtový model
4. Rozběh mlecího kola - výpočtový model
5. Popis výsledků numerického řešení
6. Závěr

Seznam doporučené odborné literatury:

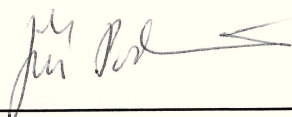
- [1] Brousil, J., Slavík, J., Zeman, V. : Dynamika. SNTL, Praha, 1989.
- [2] Juliš, K., Brepta, R. : Mechanika II. díl, dynamika. SNTL, Praha, 1987.
- [3] Vinogradov, O. : Fundamentals of Kinematics and Dynamics of Machines and Mechanisms. CRC Press, London, 2000.

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

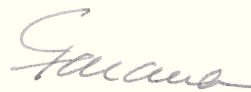
Vedoucí bakalářské práce: **doc. Ing. Jiří Podešva, Ph.D.**

Datum zadání: 16.12.2011

Datum odevzdání: 21.05.2012



doc. Ing. Jiří Podešva, Ph.D.  
vedoucí katedry



prof. Ing. Radim Farana, CSc.  
děkan fakulty

Prohlašuji, že jsem celou bakalářskou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě 18.5.2012 .....

Bohalek .....

podpis studenta

Prohlašuji, že

- jsem byl seznámen s tím, že na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo.
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě bakalářskou práci užít (§ 35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že bakalářská práce bude v elektronické podobě uložena v Ústřední knihovně VŠB-TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího bakalářské práce. Souhlasím s tím, že údaje o kvalifikační práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- beru na vědomí, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě 18.5.2012

  
.....

podpis

Jméno a příjmení autora práce:

Vít Běhálek

Adresa trvalého pobytu autora práce:

Spádová 399, Bohumín - Šunychl



## ANOTACE BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Běhálek, V. *Analýza rozběhu mlecího kola elektrárny: bakalářská práce*. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra mechaniky, 2012, 52 s.

Vedoucí práce: Podešva, J.

Bakalářská práce se zabývá analýzou rozběhu soustavy pohonu mlecího kola elektrárny. V úvodu je vysvětlen princip tepelné elektrárny. Dále je uveden popis celé soustavy a funkce hydrodynamické spojky. Nejprve je vypočtena doba rozběhu elektromotoru naprázdno. Poté je řešen rozběh mlecího kola, který je závislý na naplnění a skluzu hydrodynamické spojky. Je zde popsán limit rozběhu a možné varianty výpočtu. Realizován je výpočet zjednodušený a přesný. Cílem práce a výsledkem výpočtu je navržení takové rychlosti naplnění hydrodynamické spojky, při které bude doba rozběhu co nejkratší a elektromotor se bude nacházet v pracovní oblasti momentové charakteristiky.

## ANNOTATION OF BACHELOR THESIS

Běhálek, V. *The Power Plant Mill Wheel Run-up Analysis: Bachelor Thesis*. Ostrava: VŠB – Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Mechanical, 2012, 52 p. Thesis head: Podešva, J.

In this bachelor thesis we will analyze the run-up of a mill wheel drive system of a power plant. First we explain the principle of a thermal power plant and then we move to description of how the whole system of the hydrodynamic coupling functions. After we calculate the time necessary for the start-up of the electric motor in idle mode, we will further deal with the start-up of the mill wheel, which is dependent on how the hydrodynamic coupling fills and slides. We describe the run-up limit and different alternatives of its calculation (simplified as well as the precise method). The objective of this thesis as well as of the calculation itself is to propose such a rate of the hydrodynamic coupling filling so that the start-up time would be as short as possible and the electric motor would be in working state of a torque characteristic.

# OBSAH

<b>SEZNAM POUŽITÝCH ZNAČEK A SYMBOLŮ .....</b>	<b>8</b>
<b>1. ÚVOD .....</b>	<b>9</b>
<b>2. POPIS SOUSTAVY POHONU MLECÍHO KOLA .....</b>	<b>10</b>
2.1 Činnost hydrodynamické spojky .....	10
2.2 Regulace výkonu hydrodynamickou spojkou .....	12
<b>3. ROZBĚH NAPRÁZDNO – VÝPOČTOVÝ MODEL .....</b>	<b>13</b>
3.1 Přibližný výpočet .....	13
3.2 Nerovnoměrný rozběh jednohmotové soustavy .....	15
3.2.1 Aproximace momentové charakteristiky .....	15
3.2.2 Výpočet doby rozběhu jednohmotové soustavy .....	19
<b>4. ROZBĚH MLECÍHO KOLA – VÝPOČTOVÝ MODEL .....</b>	<b>22</b>
4.1 Dvouhmotový výpočtový model .....	22
4.1.1 Soustava „pohon“ .....	23
4.1.2 Soustava „mlecí kolo“ .....	23
4.2 Hydrodynamická spojka .....	24
4.2.1 Příklad ustáleného běhu .....	25
4.3 Řešení přechodového děje .....	25
4.3.1 Limit rozběhu .....	29
4.3.2 Výpočet přechodového děje .....	30
4.3.3 Úrovně výpočtu .....	31
4.3.4 Zjednodušený výpočet .....	33
4.3.5 Přesný výpočet .....	35
4.3.6 Praktické použití sestavených výpočtů .....	39
<b>5. POPIS VÝSLEDKŮ NUMERICKÉHO ŘEŠENÍ .....</b>	<b>40</b>
5.1 Výsledky zjednodušeného výpočtu .....	40
5.2 Výsledky přesného výpočtu .....	41
<b>6. ZÁVĚR .....</b>	<b>45</b>
<b>PŘEHLED POUŽITÉ LITERATURY .....</b>	<b>47</b>
<b>PODĚKOVÁNÍ .....</b>	<b>48</b>

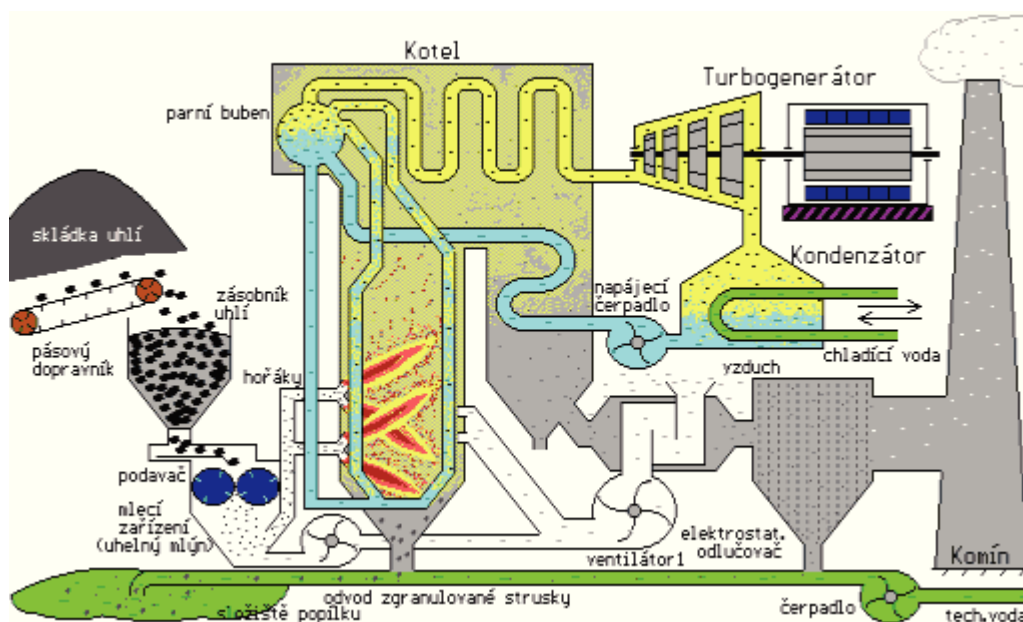
<b>SEZNAM PŘÍLOH</b> .....	<b>49</b>
<b>PŘÍLOHY</b> .....	<b>50</b>

## SEZNAM POUŽITÝCH ZNAČEK A SYMBOLŮ

A, B, C, D, E, F	[-]	Body momentové charakteristiky
$I$	$[\text{kg} \cdot \text{m}^2]$	Moment setrvačnosti
$M$	$[\text{N} \cdot \text{m}]$	Moment síly
$N$	[-]	Počet otočení
O, P, Q, R	[-]	Pomocné body podprogramu
$i$	[-]	Číslo kroku
$k$	[-]	Koeficient záběrového momentu
$n$	$[\text{ot} \cdot \text{min}^{-1}]$	Otáčky
$s$	[-]	Skluz
$t$	[s]	Čas
$\Delta t$	[s]	Integrační krok
$\varepsilon$	$[\text{rad} \cdot \text{s}^{-2}]$	Úhlové zrychlení
$\lambda$	[-]	Parametr hydrodynamické spojky
$\pi$	[-]	Ludolfovo číslo
$\varphi$	[rad]	Úhel natočení
$\omega$	$[\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}]$	Úhlová rychlost

# 1. ÚVOD

Elektřina je nejdůležitější druh sekundární energie. Díky svým výjimečným vlastnostem ji dnes najdeme téměř ve všech oborech lidské činnosti. Elektrická energie se získává v elektrárnách ze zdrojů primární energie, podle které se elektrárny dělí na tepelné, jaderné, vodní a jiné (např. větrné, solární). Elektrárny, které mimo výrobu elektrické energie dodávají do tepelné sítě i energii tepelnou, se nazývají teplárny.



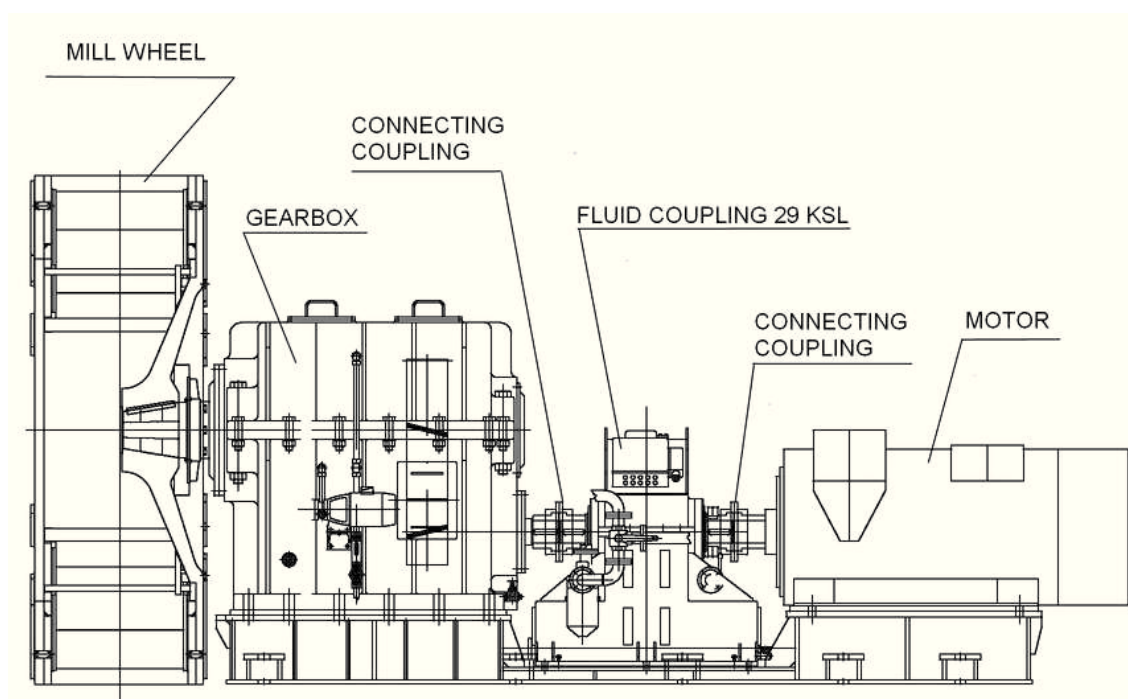
Obrázek 1.1 Schéma tepelné elektrárny

Proces výroby elektrické energie v tepelné elektrárně začíná již u přípravy fosilního paliva. Nejčastěji se používá uhlí, ale také zemní plyn nebo mazut. Uhlí z uhelné skládky putuje přes sušící zařízení a zařízení na odstranění nežádoucích předmětů do uhelného mlýna, kde se mele na uhelný prach. Z mlýnů je uhelný prach ve směsi s horkým vzduchem foukán pomocí ventilátorů do uhelných hořáků kotle. V kotli se hořením této směsi uvolňuje teplo, které přehřívá vodu. Ohřátá voda se ve výparníku mění v páru. Tuto páru je nutno dále ještě ohřát na vyšší teplotu v přehřívácích. Přehřátá pára putuje do turbíny, kde se změní energie páry (teplota, tlak) na energii mechanickou (otáčení turbíny), přičemž pára expanduje na velmi nízký výstupní tlak za současného poklesu teploty. Expandovaná pára odchází do kondenzátoru ochlazeného chladicí vodou, kde kondenzuje. Kondenzát je odčerpáván do nádrže napájecí vody. Z důvodů ztrát v celém oběhu je nutno do této nádrže přivést upravenou přídavnou vodu. Z nádrže je voda opět čerpána do kotle a celý okruh voda – pára je uzavřen.

Turbína je spojena s třífázovým asynchronním alternátorem a její otáčení způsobuje otáčení alternátoru. Ten na základě jevu elektromagnetické indukce vyrábí z mechanické energie energii elektrickou. Otáčky alternátoru jsou přibližně 3000 [ot·min<sup>-1</sup>]. Pro zvětšení účinnosti oběhu prochází pára postupně vysokotlakou a nízkotlakou částí turbíny s přehříváním páry pro nízkotlakou část. Elektrická energie se přes transformátory a vedení dopravuje až ke spotřebitelům.

## 2. POPIS SOUSTAVY POHONU MLECÍHO KOLA

Předmětem analýzy je rozběh soustavy pohonu mlecího kola. Soustrojí je tvořeno hnacím motorem, pružnou hřídelovou spojkou, hydrodynamickou spojkou, druhou pružnou hřídelovou spojkou, převodovkou a mlecím kolem.



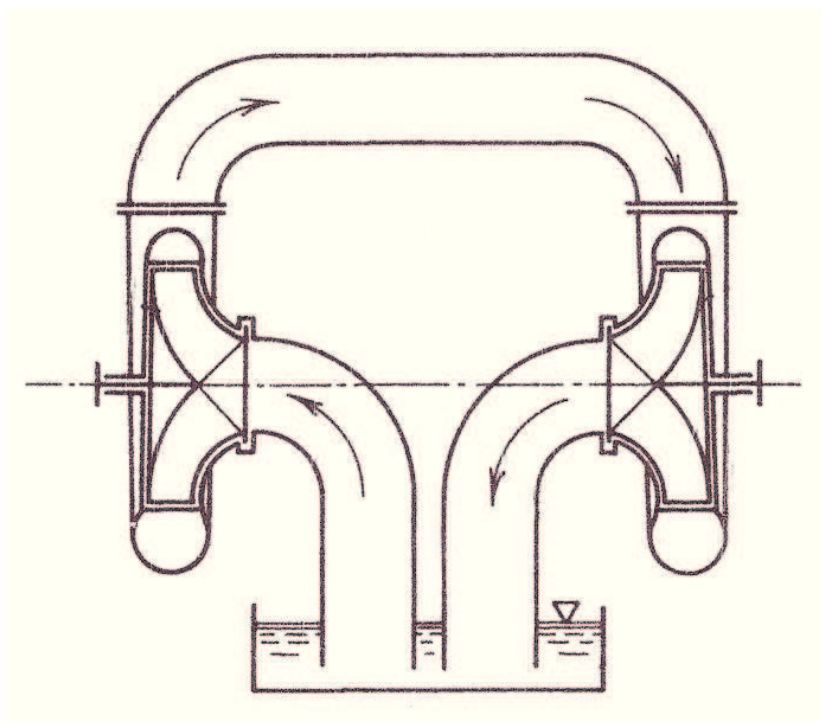
Obrázek 2.1 Soustava pohonu

### 2.1 Činnost hydrodynamické spojky

Hydrodynamické spojky patří do skupiny hydraulických spojek. Ty se dělí na spojky hydrodynamické a hydrostatické. Hydrodynamické spojky pracují většinou s okruhem uzavřeným. Otevřený okruh je méně častý. Hydrodynamické spojky s uzavřeným okruhem se dělí na neřízené spojky, samočinně řízené spojky, řízené spojky. Hydrodynamická spojka se skládá ze dvou lopatkových kol – čerpadlového

a turbínového. Čerpadlové kolo je poháněno elektromotorem, který uděluje protékající olejové náplni kinetickou energii. Tuto energii převezme turbínové kolo a předá ji převodovce, resp. mlecímu kolu. Přenos energie je zaručen oběhem oleje, který přechází z čerpadlového kola do turbínového kola a z něj se opět vrací zpět do čerpadlového kola. Oběh je podmíněn rozdílem tlaku oleje mezi oběma koly. Rozdíl tlaků slouží k překonávání odporů proti pohybu oleje v mezilopatkových kanálech kol a nastane, když se čerpadlové kolo bude otáčet většími otáčkami než kolo turbínové. Poměr rozdílu otáček turbínového kola k otáčkám čerpadlového kola se nazývá skluz. Přenos energie hydrodynamickou spojkou probíhá jen tehdy, vzniká-li skluz. Proto se hydrodynamické spojky nazývají též jako skluzové či asynchronní.

Mezi hlavní přednosti hydrodynamické spojky patří: plynulé a měkké spojení (rozpojení) hnacího stroje s hnaným strojem, tlumení rázů a torzních kmitů, plynulý rozběh hnaného stroje, ochrana převodového ústrojí před přetížením, regulace otáček hnaného stroje.



Obrázek 2.2 Schéma hydrodynamické spojky

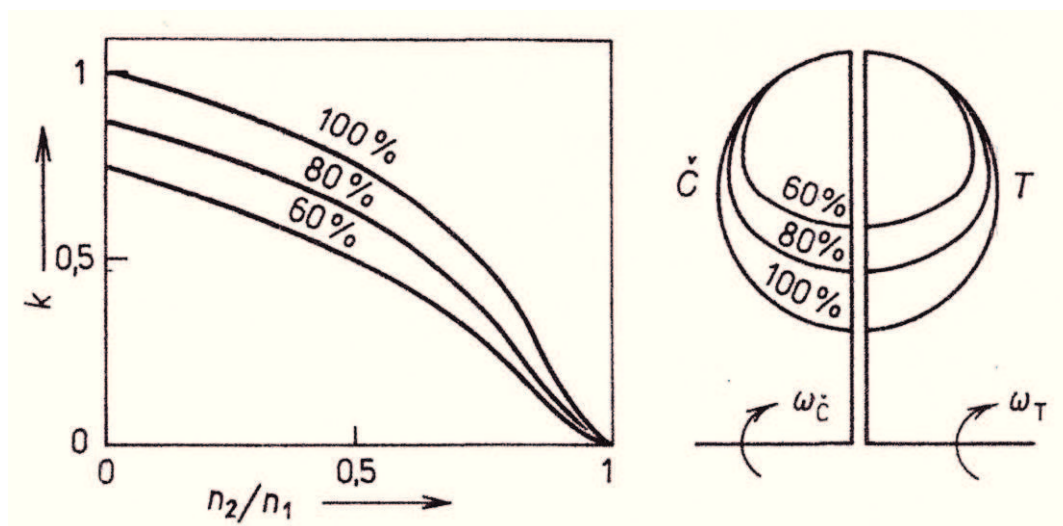


## 2.2 Regulace výkonu hydrodynamickou spojkou

Regulaci výkonu lze zajistit změnou provozní charakteristiky hnaného stroje. Momentová charakteristika se změní, když se změní moment hybnosti proudící olejové náplně. Toho lze docílit dvěma základními způsoby.

Prvním způsobem je změna průtoku oleje, obíhajícího v lopatkovém prostoru. Určitému procentu naplnění lopatkového prostoru odpovídá dílčí momentová charakteristika. Složením dílčích momentových charakteristik pro různá naplnění vzniká celý systém momentových charakteristik. Značnou výhodou této regulace je možnost úplného odlehčení hnané větve při běžícím hnacím stroji. Zvláště tehdy, vypustí-li se všechny olej. Při malém množství oleje však vzniká labilní oblast, kterou není možno regulovat.

Druhý způsob regulace výkonu je omezení průtoku kapaliny mechanickým prvkem při zcela zaplněném lopatkovém prostoru. Mechanické prvky mají nejčastěji podobu přesuvných či natáčivých clon, přesuvných stěn nebo regulačních lopatek. Při zcela vysunuté cloně přenáší spojka maximální točivý moment. Při zcela zasunuté cloně je přenášený moment minimální.



Obrázek. 2.3 Systém momentových charakteristik

### 3. ROZBĚH NAPRÁZDNO – VÝPOČTOVÝ MODEL

U rozběhu naprázdno je hydrodynamická spojka bez náplně, tzn. rozpojena. Motor roztáčí pouze pružnou spojku a vstupní čerpadlové kolo hydrodynamické spojky. Rozběh je z klidu, z toho vyplývají nulové počáteční podmínky: počáteční úhlová rychlost a počáteční úhel natočení jsou rovny nule.

$$\omega_0 = 0, \varphi_0 = 0 \quad (3.1)$$

#### 3.1 Přibližný výpočet

V přibližném výpočtu je hnací moment konstantní. Celá soustava se chová jako absolutně tuhá, je předpokládán rovnoměrně zrychlený pohyb. Odporový moment působící proti pohybu není uvažován. Platí pohybová rovnice:

$$I_c \cdot \varepsilon = M_p \quad (3.2)$$

Kde  $I_c$  je celkový moment setrvačnosti,  $\varepsilon$  je úhlové zrychlení a  $M_p$  průměrný hnací moment. Celkový moment setrvačnosti se určí jako prostý součet dílčích momentů setrvačnosti, tj. moment setrvačnosti rotoru elektromotoru, moment setrvačnosti pružné hřídelové spojky, moment setrvačnosti čerpadlového kola hydrodynamické spojky. Pro přibližný výpočet je hnací moment uvažován jako průměr záběrového a jmenovitého hnacího momentu. Záběrový moment  $M_z$  je moment při nulových otáčkách, jmenovitý moment  $M_N$  je moment při jmenovitých otáčkách motoru  $n_N = 1490$  ot/min. Přibližný výpočet slouží pro orientační kontrolu přesnějších výsledků.

#### Momenty setrvačnosti

Motor	$I_M = 15,3 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$
Pružná hřídelová spojka	$I_{PS} = 3,5 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$
Hydrodynamická spojka – čerpadlové kolo	$I_{HS1} = 5,8 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$

---

Celkový moment setrvačnosti  $I_c$ :

$$I_c = I_M + I_{PS} + I_{HS1} \quad (3.3)$$

$$I_c = 15,3 + 3,5 + 5,8$$

$$I_c = 24,6 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$$

### Průměrný hnací moment

Jmenovitý hnací moment

$$M_N = 5130 \text{ N}\cdot\text{m}$$

Koeficient pro záběrový moment

$$k = 1,2; \text{ viz. Obr. 3.1}$$

Záběrový moment

$$M_Z = k \cdot M_N = 1,2 \cdot 5130 = 6156 \text{ N}\cdot\text{m}$$

---

Průměrný hnací moment  $M_P$ :

$$M_P = (M_N + M_Z)/2 \quad (3.4)$$

$$M_P = (5130 + 6156)/2$$

$$M_P = 5643 \text{ N}\cdot\text{m}$$

### Úhlové zrychlení

$$\varepsilon = M_P/I_C \quad (3.5)$$

$$\varepsilon = 5643/24,6$$

$$\varepsilon = 229,390 \doteq 229 \text{ rad/s}^{-2}$$

### Jmenovité otáčky

$$n_N = 1488 \text{ ot/min}$$

### Jmenovitá úhlová rychlost

$$\omega_N = \pi \cdot \frac{n_N}{30} = \pi \cdot \frac{1488}{30} = 155,82 \doteq 156 \text{ rad/s}$$

### Časový průběh úhlové rychlosti

$$\omega = \varepsilon \cdot t \quad (3.6)$$

### Doba rozběhu (dosažení jmenovitých otáček)

$$t_r = \frac{\omega_N}{\varepsilon} = \frac{156}{229} = 0,681 \text{ s}$$

### Časový průběh úhlové dráhy

$$\varphi = \frac{1}{2} \varepsilon \cdot t^2 \quad (3.7)$$

### Úhlová dráha rozběhu

$$\varphi = \frac{1}{2} \varepsilon \cdot t^2 = \frac{1}{2} \cdot 229 \cdot 0,681^2 = 53,1 \text{ rad}$$

### Počet otočení při rozběhu

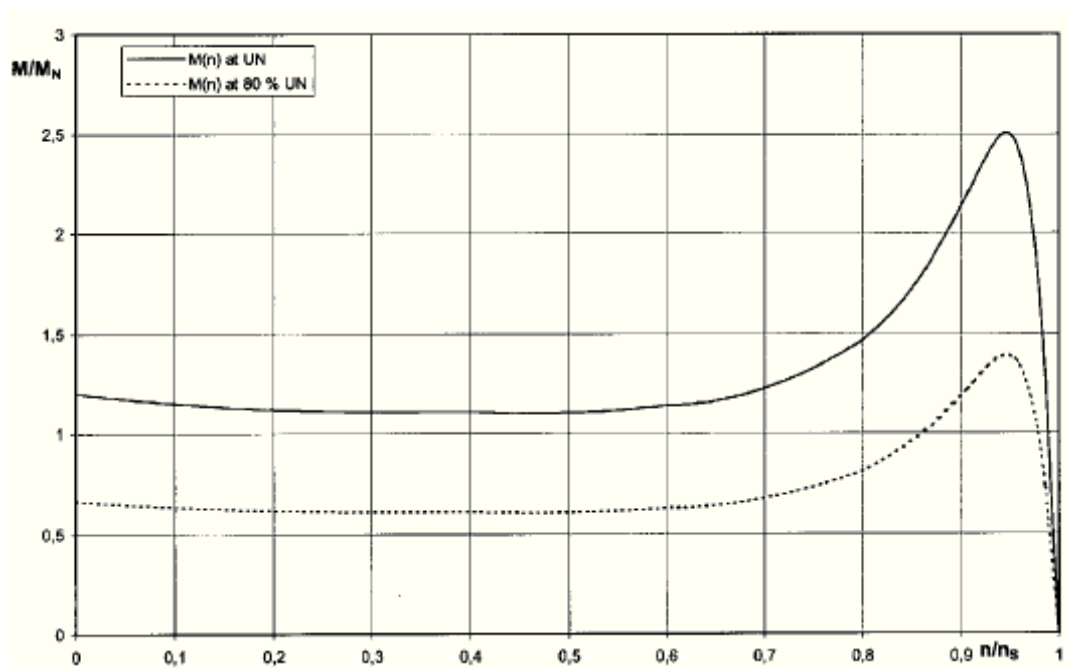
$$N_r = \frac{\varphi}{2\pi} \quad (3.8)$$

$$N_r = \frac{53,1}{2\pi} = 8,4 \text{ otočení}$$

## 3.2 Nerovnoměrný rozběh jednohmotové soustavy

Nerovnoměrný rozběh jednohmotové soustavy zahrnuje vliv charakteristiky motoru, závislosti momentu motoru na otáčkách (viz obrázek 3.1). Na vodorovné ose grafu je poměr okamžitých otáček k synchronním otáčkám  $n_s = 1500 \text{ ot/min}$ . Synchronní otáčky jsou otáčky při běhu bez zatížení, hnací moment je nulový. Na svislé ose je poměr hnacího momentu, odpovídajícího daným otáčkám, ke jmenovitému momentu  $M_N = 5130 \text{ N} \cdot \text{m}$ . Důležitými body charakteristiky jsou záběrový moment při nulových otáčkách  $M_Z$  a moment zvratu  $M_{ZV}$  – maximum charakteristiky. Koncový bod charakteristiky odpovídá synchronním otáčkám a nulovému hnacímu momentu. První část charakteristiky, od nulových otáček po bod zvratu, je oblast rozběhu. Druhá část charakteristiky, od bodu zvratu po synchronní otáčky, je provozní oblast. V provozní oblasti by se měl motor za provozu pohybovat.

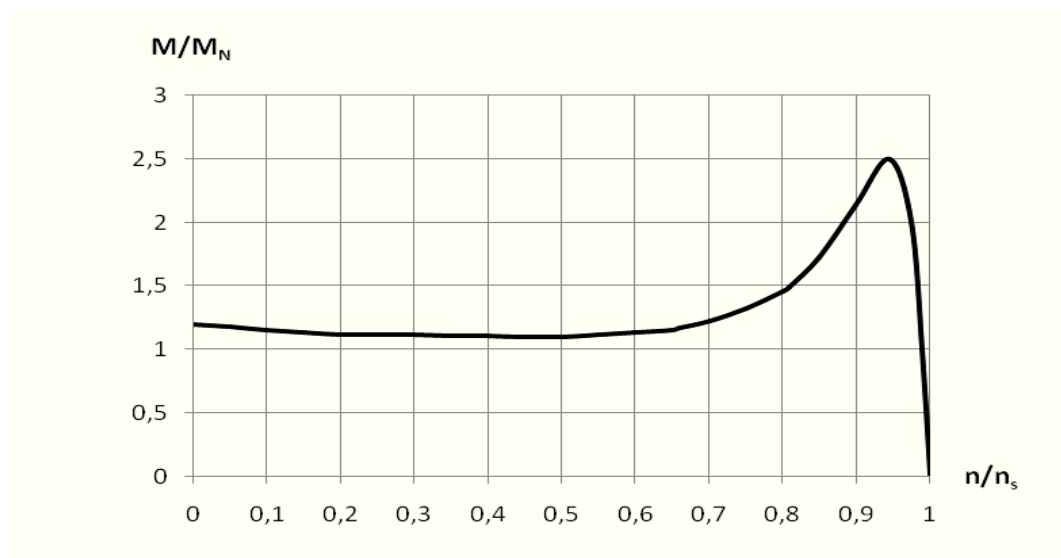
### 3.2.1 Aproximace momentové charakteristiky



Obrázek. 3.1 Momentová charakteristika motoru

Momentová charakteristika v grafické podobě byla digitalizována. Poté bylo zvoleno 5 úseků s krajními body A, B, C, D, E, F, ve kterých byla charakteristika aproximována. Souřadnice bodů jsou v tabulce 3.1. V úsecích od bodu A až E byly pro aproximaci použity 4 přímky, jejichž směrnice jsou v tabulce 3.2.

Úsek E – F byl aproximován Klossovou funkcí<sup>1</sup> pro momentové charakteristiky elektromotorů, viz (3.9).



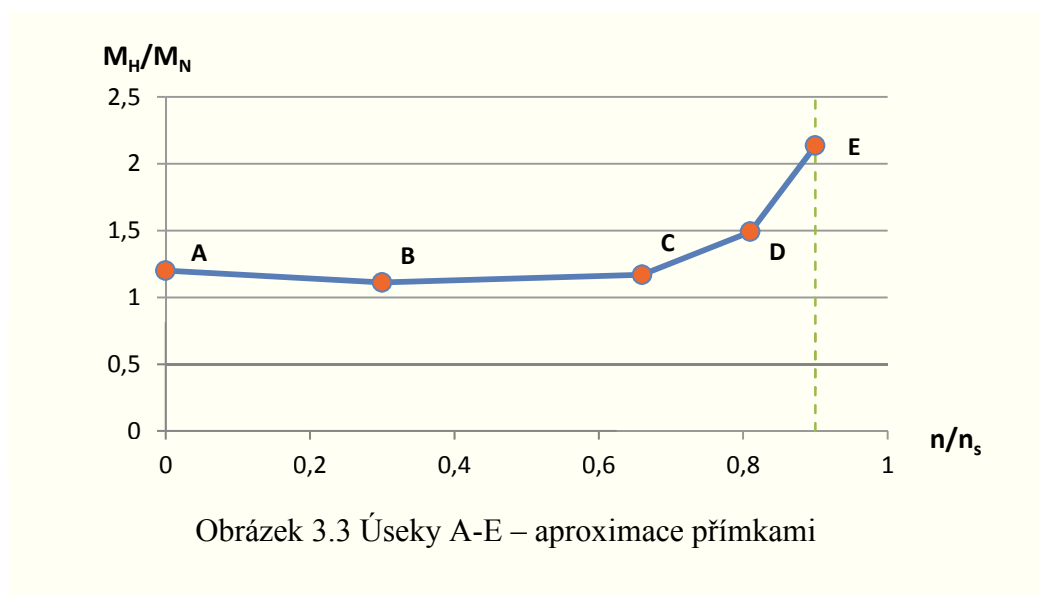
Obrázek 3.2 Digitalizovaná charakteristika motoru

Bod	$n/n_s$	$M/M_N$
A	0	1,2
B	0,30	1,1118
C	0,66	1,1694
D	0,81	1,4915
E	0,90	2,1355
F	1	0

	$y=k \cdot x+q$	
úsek	k	q
AB	-0,2940	1,2000
BC	0,1600	1,0638
CD	2,1473	-0,2478
DE	7,1556	-4,3045

Tabulka 3.1 Souřadnice krajních bodů

Tabulka 3.2 Směrnice tvary přímek



Obrázek 3.3 Úseky A-E – aproximace přímkami

<sup>1</sup> Klossova funkce je uvedena v [3] – Elektrické pohony, str. 80

<sup>2</sup> V tabulce 3.3 je z důvodu velikosti vynechán sloupec okamžité otáčky.

Pro aproximaci úseku E-F, byla použita funkce 3.9, kde  $M_H$  je hnací moment,  $M_{zv}$  je moment zvratu,  $s_{zv}$  je skluz v bodě zvratu a  $s$  je proměnný skluz.

### Klossova funkce

$$M_H = \frac{2 \cdot M_{ZV}}{\frac{s}{s_{ZV}} + \frac{s_{ZV}}{s}} \quad (3.9)$$

### Moment zvratu

$$M_{ZV} = 2,5 \cdot M_N \quad (3.10)$$

$$M_{ZV} = 2,5 \cdot 5130 = 12825 \text{ N} \cdot \text{m}$$

### Skluz zvratu

$$s_{ZV} = \frac{\omega_s - \omega_{ZV}}{\omega_s} \quad (3.11)$$

Kde  $\omega_s$  je úhlová rychlost při synchronních otáčkách  $n_s$ ,  $\omega_{ZV}$  je úhlová rychlost při otáčkách v bodě zvratu  $n_{ZV}$ .

$$n_s = 1500 \text{ ot/min} = 25 \text{ ot/s}$$

$$\omega_s = 2 \cdot \pi \cdot n_s = 2 \cdot \pi \cdot 25 = 157,08 \text{ rad/s}$$

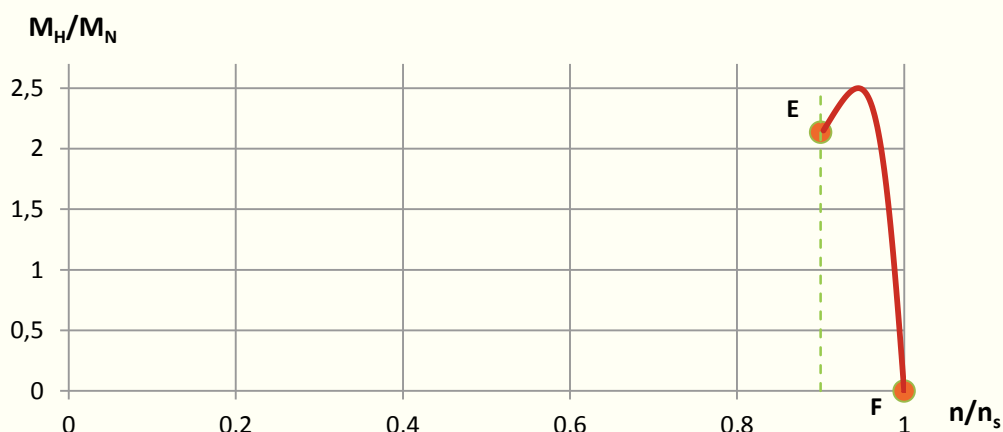
$$n_{ZV} = 1417,5 \text{ ot/min} = 23,625 \text{ ot/s}$$

$$\omega_{ZV} = 2 \cdot \pi \cdot n_{ZV} = 2 \cdot \pi \cdot 23,625 = 148,440 \text{ rad/s}$$

### Proměnný skluz

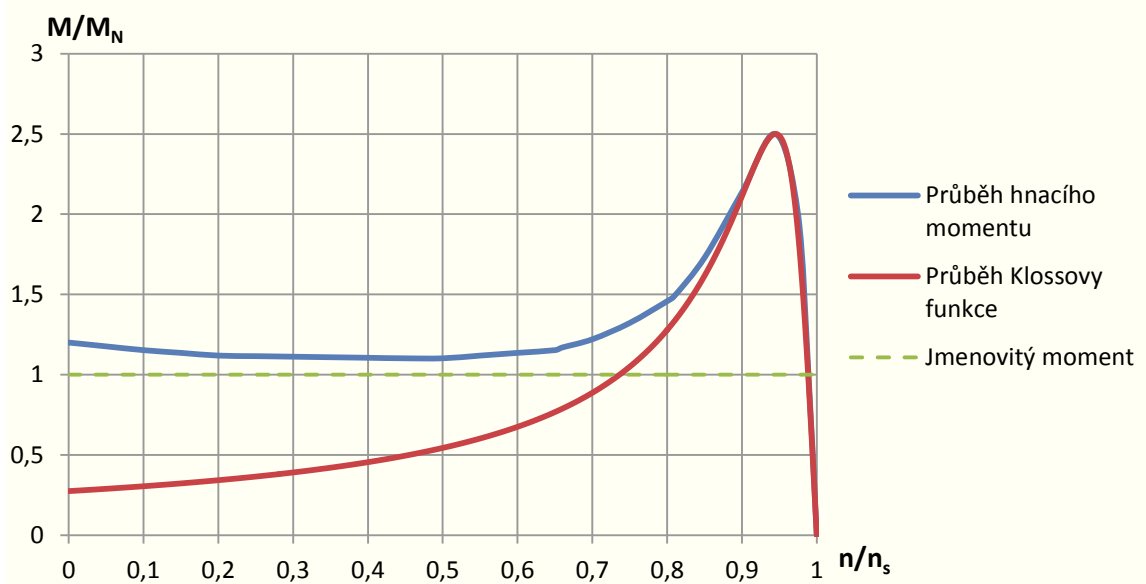
$$s = \frac{\omega_s - \omega}{\omega_s} \quad (3.12)$$

Kde  $\omega$  je okamžitá úhlová rychlost,  $\omega_s$  je úhlová rychlost při synchronních otáčkách.



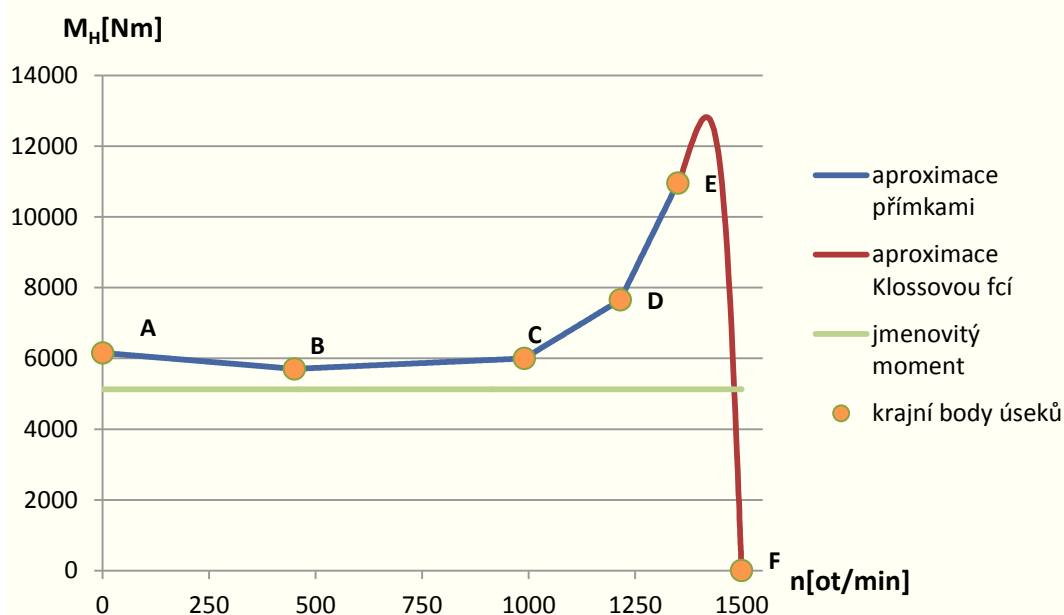
Obrázek 3.4 Úsek E-F – aproximace Klossovou funkcí

Klossovu funkci nelze použít pro aproximaci celé momentové charakteristiky. Obrázek 3.5 ukazuje, že její průběh se pro převážnou část otáček značně liší od průběhu digitalizované charakteristiky. Shodují se přibližně v oblasti, ve které je poměr okamžitých otáček k synchronním otáčkám v intervalu  $\langle 0,9; 1 \rangle$ . Pro tuto oblast je Klossova funkce platná.



Obrázek 3.5 Průběh Klossovy funkce

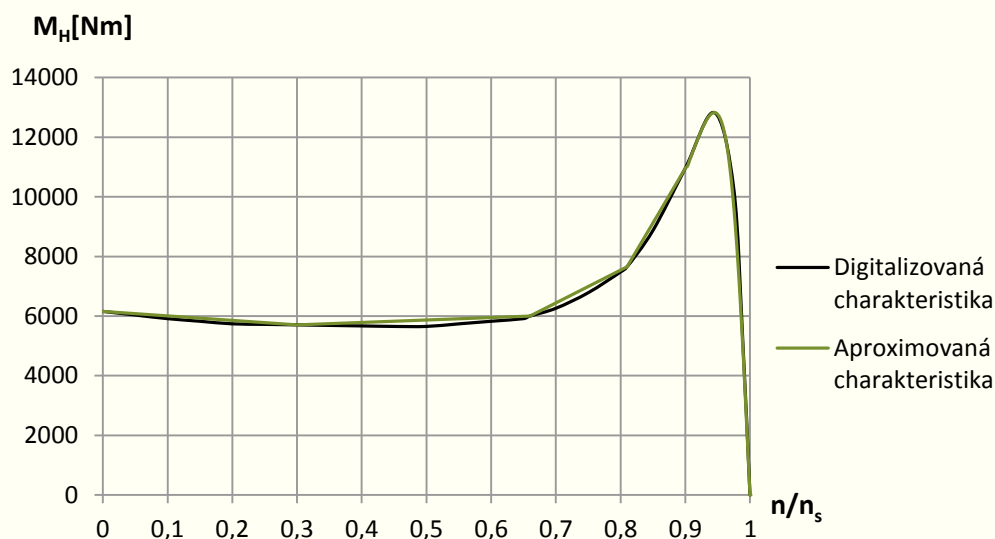
Výsledná aproximovaná charakteristika byla složena z aproximovaných úseků a převedena na přímou závislost hnacího momentu  $M_H$  [Nm] na otáčkách  $n$  [ot/min].



Obrázek 3.6 Aproximovaná momentová charakteristika



Vizuální rozdíl mezi digitalizovanou a aproximovanou momentovou charakteristikou je nepatrný, tudíž akceptovatelný pro výpočet.



Obrázek 3.7 Srovnání digitalizované a aproximované charakteristiky

### 3.2.2 Výpočet doby rozběhu jednohmotové soustavy

Pohybová rovnice soustavy při běhu naprázdno je:

$$I_c \cdot \varepsilon = M_H \quad (3.12)$$

kde  $I_c = 24,6 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$  - celkový moment setrvačnosti (viz 3.1 Přibližný výpočet)  
 $\varepsilon$  - úhlové zrychlení  
 $M_H$  - hnací moment, závislý na úhlové rychlosti

Pohybová rovnice pro numerické řešení má tvar:

$$\varepsilon - \frac{M_H}{I_c} = 0 \quad (3.13)$$

Pro řešení byl použit program EXCEL.

Výpočet byl proveden pomocí tabulky (viz tabulka 3.3<sup>2</sup>). Tabulka se skládá z devíti sloupců, tj. čísla kroku  $i$ , doby rozběhu  $t$ , okamžité úhlové rychlosti  $\omega$ , okamžitých otáček  $n$ , proměnného skluzu  $s$ , poměru otáček  $n/n_s$ , úhlu natočení  $\varphi$ , hnacího momentu  $M_H$ , úhlového zrychlení  $\varepsilon$ . Do nultého kroku výpočtu pro počáteční čas  $t_0 = 0 \text{ s}$  byly dosazeny počáteční podmínky nulová úhlová rychlost  $\omega_0 = 0 \text{ rad/s}$  a nulový úhel natočení  $\varphi_0 = 0 \text{ rad}$ . Okamžité otáčky  $n$  jsou určeny

<sup>2</sup> V tabulce 3.3 je z důvodu velikosti vynechán sloupec okamžité otáčky.

jako podíl okamžité úhlové rychlosti  $\omega$  a  $2\pi$ . Proměnný skluz  $s$  je vypočten jako podíl rozdílu úhlové rychlosti synchronních otáček  $\omega_s$  a okamžité úhlové rychlosti  $\omega$  k úhlové rychlosti synchronních otáček  $\omega_s$ . Ve sloupci poměr otáček je poměr okamžitých otáček  $n$  k synchronním otáčkám  $n_s$ . Za hnací moment  $M_H$  je vždy výpočtem dosazena hodnota hnacího momentu závislá na okamžitých otáčkách, odpovídající aproximované momentové charakteristice. Úhlové zrychlení  $\varepsilon$  se dle pohybové rovnice rovná podílu hnacího momentu  $M_H$  a celkového momentu setrvačnosti  $I_C$ .

Pro první, resp.  $i$ -tý krok, je doba rozběhu  $t_i = t_{i-1} + \Delta t$ . Délka integračního kroku byla zvolena  $\Delta t = 0,001 \text{ s}$ . Ve značně krátkém časovém úseku se hnací moment elektromotoru téměř nezmění, považujeme jej za konstantní, a proto je možno předpokládat rovnoměrně zrychlený pohyb, tudíž konstantní úhlové zrychlení. Okamžitá úhlová rychlost  $\omega_i$  je tedy určena jako součet předchozí úhlové rychlosti  $\omega_{i-1}$  a součinu úhlového zrychlení  $\varepsilon$  a integračního kroku  $\Delta t$ :

$$\omega_i = \omega_{i-1} + \varepsilon_{i-1} \cdot \Delta t$$

Úhel natočení je pak:  $\varphi_i = \varphi_{i-1} + \omega_{i-1} \cdot \Delta t + 1/2 \cdot \varepsilon_{i-1} \cdot \Delta t^2$

Kde  $\varphi_{i-1}$ ,  $\omega_{i-1}$ ,  $\varepsilon_{i-1}$  jsou vždy veličiny z předchozího kroku.

Hnací moment se mění v závislosti na otáčkách motoru, resp. na poměru okamžitých otáček k synchronním otáčkám  $n/n_s$ . Hodnoty hnacího momentu jsou získány pro konkrétní otáčky dosazením do rovnice některé aproximační přímky (viz tabulka 3.2) nebo do Klossovy funkce (3.9). Tedy pro úsek AB je hodnota momentu:  $M_H = [-0,294 \cdot (n/n_s) + 1,200] \cdot M_n$ , čemuž v nultém kroku, pro poměr otáček  $n/n_s = 0$ , odpovídá záběrový moment  $M_Z = 6156 \text{ N} \cdot \text{m}$ . Změna vzorce pro získání hodnoty hnacího momentu v jednotlivých úsecích byla realizována v EXCELU pomocí vnořených funkcí KDYŽ. Jakmile je poměr otáček  $n/n_s$  větší než poměr otáček krajního bodu, což je jeho „x-ová“ souřadnice, přiřadí se do buňky vzorec pro další úsek. Konkrétně pro všechny úseky je to:

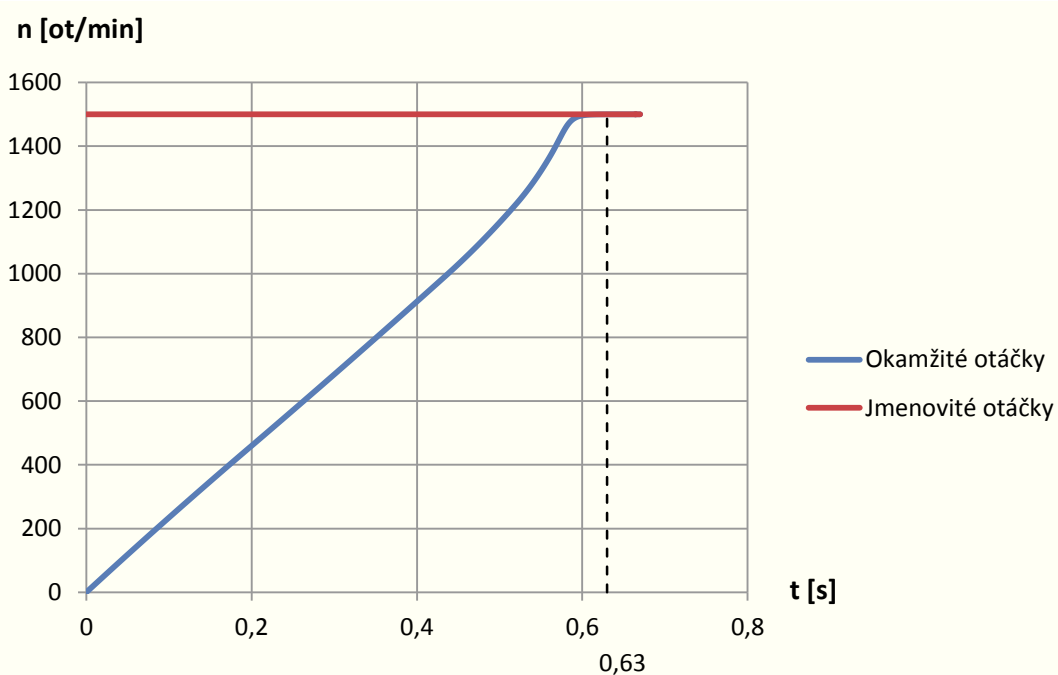
AB:	$M_H = [-0,2940 \cdot (n/n_s) + 1,200] \cdot M_n$	
BC:	$M_H = [0,1600 \cdot (n/n_s) + 1,0638] \cdot M_n$	
CD:	$M_H = [2,1473 \cdot (n/n_s) - 0,2473] \cdot M_n$	
DE:	$M_H = [7,1556 \cdot (n/n_s) - 4,3045] \cdot M_n$	
EF:	$M_H = \frac{2 \cdot M_{ZV}}{\frac{s}{s_{ZV}} + \frac{s_{ZV}}{s}}$	(3.9)

Řešení má formu tabulky, resp. grafu průběhu okamžitých otáček v čase (obrázek 3.8). Konkrétní zkrácená tabulka výpočtu je uvedena v příloze č. 1.

Počet kroků	Doba rozběhu	Úhlová rychlost	Proměnný skluz	Poměr otáček	Úhel natočení	Hnací moment	Úhlové zrychlení
i [-]	t [s]	$\omega$ [rad/s]	s [-]	$n/n_s$ [-]	$\phi$ [rad]	M [Nm]	$\epsilon$ [rad/s <sup>2</sup> ]
0	0	0	$=(\omega_s - \omega_0)/\omega_s$	$=n_0/n_s$	0	$=(k \cdot (n_0/n_s) + q) \cdot M_N$	$=M_0/I_c$
1	0,001	$=\omega_0 + \epsilon_0 \cdot \Delta t$	$=(\omega_s - \omega_1)/\omega_s$	$=n_1/n_s$	$=\phi_0 + \omega_0 \cdot \Delta t + 1/2 \cdot \epsilon_0 \cdot \Delta t^2$	$=(k \cdot (n_1/n_s) + q) \cdot M_N$	$=M_1/I_c$
2	0,002	...	...	...	...	...	...
...	...	...	...	...	...	...	...
629	0,629	157,07030	5,93843E-05	0,99994	48,67604	27,69464	1,12580

Tabulka 3.3 Princip výpočtu v programu Excel

Řešením byla zjištěna doba rozběhu naprázdno  $t_r = 0,63$  s. Do doby přibližně 0,5 s stoupají otáčky téměř rovnoměrně. V úseku do cca 1000 ot/min je hnací moment téměř konstantní a jedná se zhruba o rovnoměrně zrychlený pohyb. Nad 1000 ot/min hnací moment výrazně stoupá a otáčky stoupají rychleji. Jakmile dosáhnou bodu zvratu, hnací moment velmi rychle klesá a otáčky konvergují k synchronním otáčkám. Vypočtená doba 0,63 s dobře souhlasí s časem vypočteným přibližným výpočtem. Počet otočení za tuto dobu je přibližně 7,8.



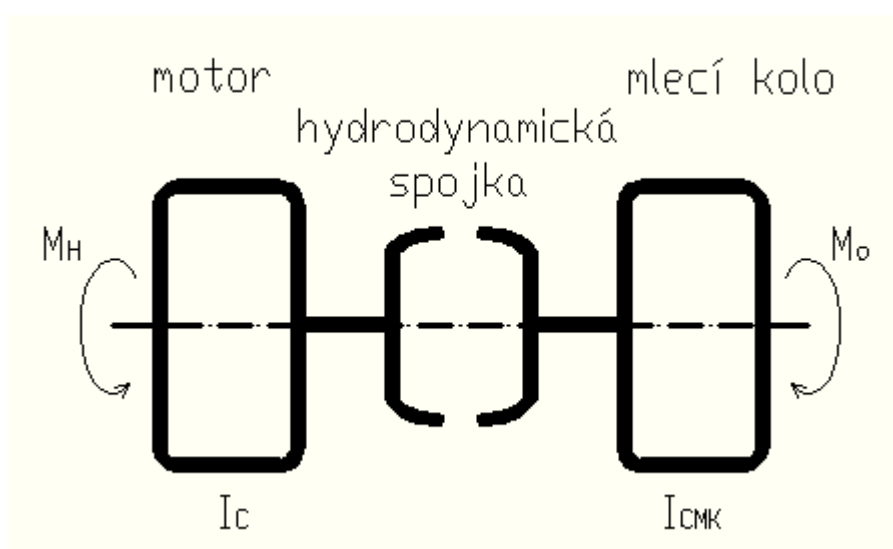
Obrázek 3. 8 Nerovnoměrný rozběh – časový průběh otáček

## 4. ROZBĚH MLECÍHO KOLA – VÝPOČTOVÝ MODEL

Po rozběhnutí motoru naprázdno bude spuštěno naplňování hydrodynamické spojky. Hnací moment elektromotoru se začne přenášet přes převodovku do mlecího kola a tato část soustavy se začne roztáčet. Soustava se rozbíhá s prázdným mlecím kolem, tj. bez uhelné náplně.

### 4.1 Dvouhmotový výpočtový model

Pro výpočtovou analýzu rozběhu mlecího kola byl formulován dvouhmotový výpočtový model dle schématu na obrázku 4.1.



Obrázek 4. 1. Dvouhmotový výpočtový model

Ve výpočtovém modelu je  $M_H$  proměnný hnací moment motoru,  $M_o$  je odporový moment, působící proti směru pohybu. Velikost odporového momentu není v technické dokumentaci upřesněna. Proto byla jeho hodnota odhadnuta na  $M_o = 5000 \text{ N} \cdot \text{m}$  s ohledem na jmenovitý moment motoru.

### 4.1.1 Soustava „pohon“

Dílčí momenty setrvačnosti na straně pohonu se nemění. Do výpočtu je však zahrnut vliv olejové náplně. Proto je do celkového momentu setrvačnosti započtena polovina momentu setrvačnosti olejové náplně hydrodynamické převodovky.

#### Momenty setrvačnosti

Motor	$I_M = 15,3 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$
Pružná hřídelová spojka	$I_{PS} = 3,5 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$
Hydrodynamická spojka – čerpadlové kolo	$I_{HS1} = 5,8 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$
Moment setrvačnosti poloviny olejové náplně	$I_o = 1,5 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$

---

Celkový moment setrvačnosti na straně pohonu  $I_C$ :

$$I_C = I_M + I_{PS} + I_{HS1} + I_o \quad (4.1)$$

$$I_C = 15,3 + 3,5 + 5,8 + 1,5$$

$$I_C = 26,1 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$$

### 4.1.2 Soustava „mlecí kolo“

Soustavu „mlecí kolo“ tvoří turbínové kolo hydrodynamické spojky, pružná hřídelová spojka, převodovka a mlecí kolo. Do celkového momentu setrvačnosti je opět přičten moment setrvačnosti druhé poloviny olejové náplně.

#### Momenty setrvačnosti na straně mlecího kola

Hydrodynamická spojka – turbínové kolo	$I_M = 12,1 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$
Moment setrvačnosti poloviny olejové náplně	$I_o = 1,5 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$
Pružná hřídelová spojka	$I_{PS} = 3,5 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$
Převodovka <sup>3</sup>	$I_{PR} = 17,7 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$
Mlecí kolo <sup>4</sup>	$I_{MK} = 2488,2 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$

---

Celkový moment setrvačnosti na straně pohonu  $I_{CMK}$ :

$$I_{CMK} = I_M + I_o + I_{PS} + I_{PR} + I_{MK} \quad (4.2)$$

$$I_{CMK} = 12,1 + 1,5 + 3,5 + 17,7 + 2488,2$$

$$I_{CMK} = 2523 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$$

---

<sup>3</sup> Moment setrvačnosti převodovky  $I_{PR}$  je redukováný na výstupní hřídel hydrodynamické spojky.

<sup>4</sup> Moment setrvačnosti mlecího kola  $I_{MK}$  je redukováný na výstupní hřídel hydrodynamické spojky.

## 4.2 Hydrodynamická spojka

Hydrodynamická spojka přenáší moment jen tehdy, je-li naplněna olejem, a to v rozmezí 0 – 100 % naplnění, přičemž při procentu naplnění blízkému nule, se moment nepřenáší. Druhou podmínkou přenosu momentu je rozdíl otáček na vstupu a výstupu spojky, tzv. skluz. Tuto závislost, dle technické dokumentace, popisuje vztah:

$$M_{HS} = 2,14 \cdot 10^{-3} \cdot \lambda \cdot n^2 \quad (4.3)$$

kde  $M_{HS}$  - krouticí moment, přenášený hydrodynamickou spojkou [N·m]

$\lambda$  - parametr

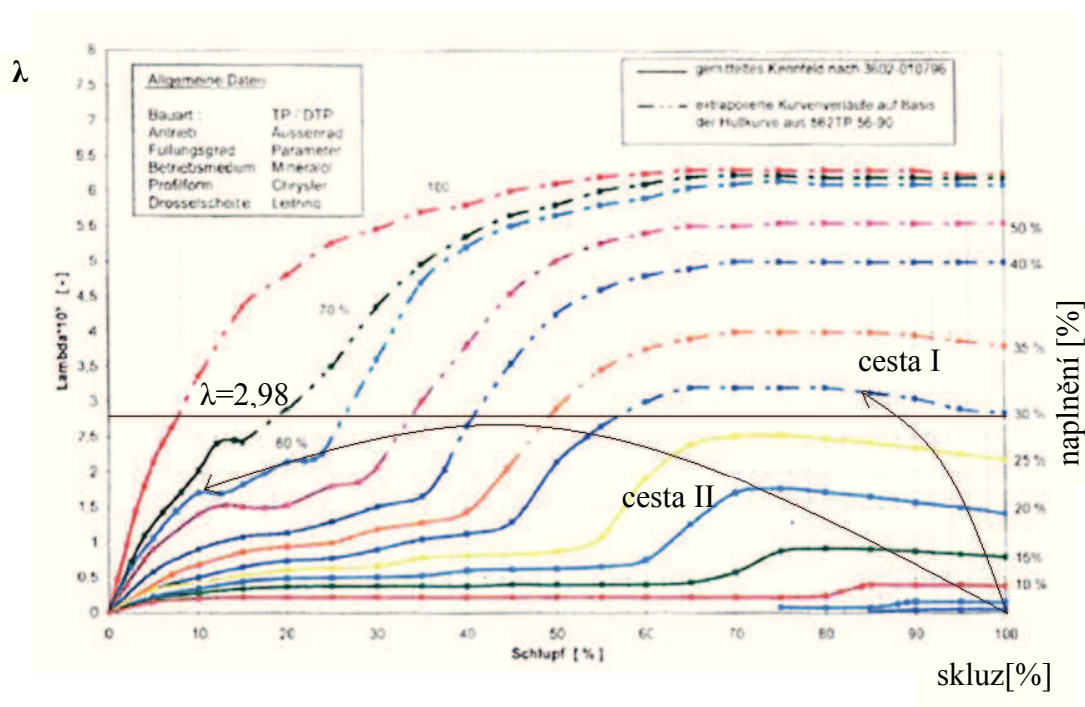
$n$  - otáčky [ot/min]

Hodnota parametru  $\lambda$  v závislosti na skluzu a na naplnění spojky je v grafu na obrázku 4.2. Skluz je definován jako relativní rozdíl otáček na vstupu a výstupu, vztažený k otáčkám na vstupu:

$$skluz = \frac{n - n_v}{n} \quad (4.4)$$

kde  $n$  - otáčky vstupu [ot/min]

$n_v$  - otáčky výstupu [ot/min]



Obrázek 4.2 Hodnoty parametru  $\lambda$ , grafický záznam

Z obrázku 4.2 je zřejmé, že při nulovém skluzu, tj. když jsou otáčky na vstupu a výstupu shodné, se nepřenáší žádný moment. Při narůstajícím skluzu se však přenášený moment zvětšuje.

#### 4.2.1 Příklad ustáleného běhu

Funkce hydrodynamické spojky je pochopitelná na příkladu ustáleného běhu. Ustálený běh nastává při 100% naplnění spojky. Hnací moment motoru je v pracovní oblasti momentové charakteristiky. Je-li předpokládán odpor proti pohybu  $M_o = 5000 \text{ N} \cdot \text{m}$ , pak tomuto zatížení, dle charakteristiky pohonu, odpovídají otáčky  $n = 1488 \text{ ot/min}$ . Odpor proti pohybu  $M_o$  se rovná přenášenému momentu  $M_{HS}$ . Dosazením těchto hodnot do vzorce (4.3) je získán potřebný parametr  $\lambda = 1,55$ . Této hodnotě  $\lambda$  připadá dle grafického záznamu na obrázku 4.2 skluz 2 %. Otáčky na výstupu hydrodynamické spojky tedy jsou:

$$n_v = 98 \cdot n = 98 \cdot 1488 = 1458 \text{ ot/min}.$$

#### 4.3 Řešení přechodového děje

Přechodový děj označuje situaci, kdy se soustava „pohon“ otáčí synchronními otáčkami  $n = n_s = 1500 \text{ ot/min}$  a zároveň soustava „mlecí kolo“ je nejprve v klidu a poté se začne roztáčet. U soustavy „pohon“ v klidu je skluz 100 %, naplnění hydrodynamické spojky je 0 % (viz obrázek 4.2 - pravý dolní roh diagramu). Jakmile se spustí naplňování hydrodynamické spojky, stoupá naplnění (na diagramu svisle vzhůru) a spojka začne přenášet krouticí moment. Soustava mlecího kola se dá do pohybu, urychluje se a skluz se snižuje (na diagramu vodorovně doleva). Tento proces může probíhat několika možnými cestami, dva příklady jsou naznačeny na obrázku 4.2.

Pro stanovení optimální cesty je nutné si uvědomit, že pohon soustavy je limitován bodem zvratu na charakteristice motoru (viz obrázek 3.5), tedy stavem  $n = 1417,5 \text{ ot/min}$ ,  $M_H = 12825 \text{ N} \cdot \text{m}$ . Podle vzorce (4.3), kde  $M_H = M_{HS}$ , tomuto stavu odpovídá maximální možná hodnota parametru  $\lambda_{\max}$ , zobrazená plnou čarou na diagramu na obrázku 4.2.

$$\lambda_{\max} = \frac{M_H}{2,14 \cdot 10^{-3} \cdot n^2} \quad (4.5)$$

$$\lambda_{\max} = \frac{12825}{2,14 \cdot 10^{-3} \cdot 1417,5^2} = 2,98$$



Je evidentní, že při rozběhu po „cestě I“ bude překročen bod zvratu charakteristiky motoru. Ten se dostane z provozní oblasti do oblasti rozběhu a rozběh bude nestabilní. Naproti tomu při rozběhu po „cestě II“ se motor stále pohybuje v provozní oblasti. Komplikace při rozběhu po „cestě I“ jsou způsobeny příliš rychlým naplňováním spojky. Hlavním účelem matematického modelování rozběhu je tedy navržení takové maximální rychlosti naplňování hydrodynamické spojky, při které bude motor pracovat v provozní oblasti a rozběh bude stabilní.

Za účelem výpočtu přechodového děje, rozběhu mlecího kola, bylo nutné závislost parametru  $\lambda$  na skluzu a naplnění spojky digitalizovat. V programu EXCEL byla vytvořena tabulka hodnot parametru  $\lambda$  (viz tabulka 4.1).

Skluz	Naplnění	0%	5%	10%	15%	20%	25%	30%	35%	40%	50%	60%	70%	100%
0%		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10%		0	0	0,19	0,29	0,35	0,44	0,52	0,7	0,93	1,41	1,71	2,04	3,35
20%		0	0	0,22	0,36	0,5	0,61	0,74	0,94	1,15	1,54	2,15	2,9	4,81
30%		0	0	0,22	0,36	0,5	0,66	0,9	1,2	1,5	2,07	3,59	4,33	5,45
40%		0	0	0,22	0,36	0,59	0,81	1,13	1,44	2,65	3,79	5,2	5,36	5,81
50%		0	0	0,22	0,4	0,63	0,86	2,15	2,86	4,24	5	5,65	5,79	6,11
60%		0	0	0,22	0,4	0,74	1,86	2,97	3,72	4,79	5,4	5,88	6,09	6,25
70%		0	0	0,22	0,57	1,68	2,5	3,18	4	5	5,5	6,09	6,22	6,31
80%		0	0,07	0,22	0,9	1,68	2,47	3,18	4	5	5,55	6,09	6,18	6,29
90%		0	0,15	0,38	0,85	1,55	2,33	3,02	3,92	5	5,55	6,09	6,18	6,27
100%		0	0,15	0,38	0,77	1,4	2,16	2,83	3,77	5	5,55	6,09	6,18	6,25

Tabulka 4.1 Digitalizace parametru  $\lambda$  v závislosti na skluzu a naplnění

Dále byl v EXCELU vytvořen výpočtový podprogram, který pro libovolnou hodnotu skluzu a libovolnou hodnotu naplnění spojky vypočte hodnotu parametru  $\lambda$  lineární interpolací z tabelovaných hodnot. Podprogram byl sestaven z několika vlastních funkcí programu EXCEL. Princip výpočtu je následující: Pro libovolnou hodnotu skluzu (např. 34 %) je vždy přiřazena nejbližší nižší (30 %) a nejbližší vyšší hodnota skluzu (40 %) uvedená v tabulce 4.1. Taktéž pro libovolnou hodnotu naplnění (např. 57 %) je přiřazena nejbližší nižší (50 %) a nejbližší vyšší (60 %) hodnota naplnění. Takto se vytvoří čtyři body (např.: O, P, Q, R) se souřadnicemi skluz (x-ová souřadnice) a naplnění (y-ová souřadnice), ve kterých je z tabulky 4.1. odečtena hodnota parametru  $\lambda$ .

O [30;50]	$\lambda_1 = 2,07$
P [40;50]	$\lambda_2 = 3,79$
Q [30;60]	$\lambda_3 = 3,59$
R [40;60]	$\lambda_4 = 5,20$

Pro každé dva body nižší (O, P) a vyšší (Q, R) hodnoty naplnění je provedena lineární interpolace.

$$\lambda_{50\%} = 17,2 \cdot x - 3,09$$

$$\lambda_{60\%} = 16,1 \cdot x - 1,24$$

Tím jsou získány předpisy dvou přímek parametru  $\lambda$  pro nižší a vyšší hodnotu naplnění. Do předpisu přímek je následně dosazena hodnota libovolného skluzu a výsledkem je hodnota parametru  $\lambda$  libovolného skluzu pro nižší a vyšší naplnění.

$$\lambda_{50\%} = 17,2 \cdot 0,34 - 3,09 = 2,758$$

$$\lambda_{60\%} = 16,1 \cdot 0,34 - 1,24 = 4,234$$

Dále je vypočten rozdíl vyššího a nižšího procenta naplnění, rozdíl libovolného a nižšího procenta naplnění a také rozdíl hodnot dvou parametrů  $\lambda$ .

$$60\% - 50\% = 10\%$$

$$57\% - 50\% = 7\%$$

$$\lambda_{60\%} - \lambda_{50\%} = 4,234 - 2,758 = 1,476$$

Výsledná hodnota parametru  $\lambda_v$  je určena přímou úměrností.

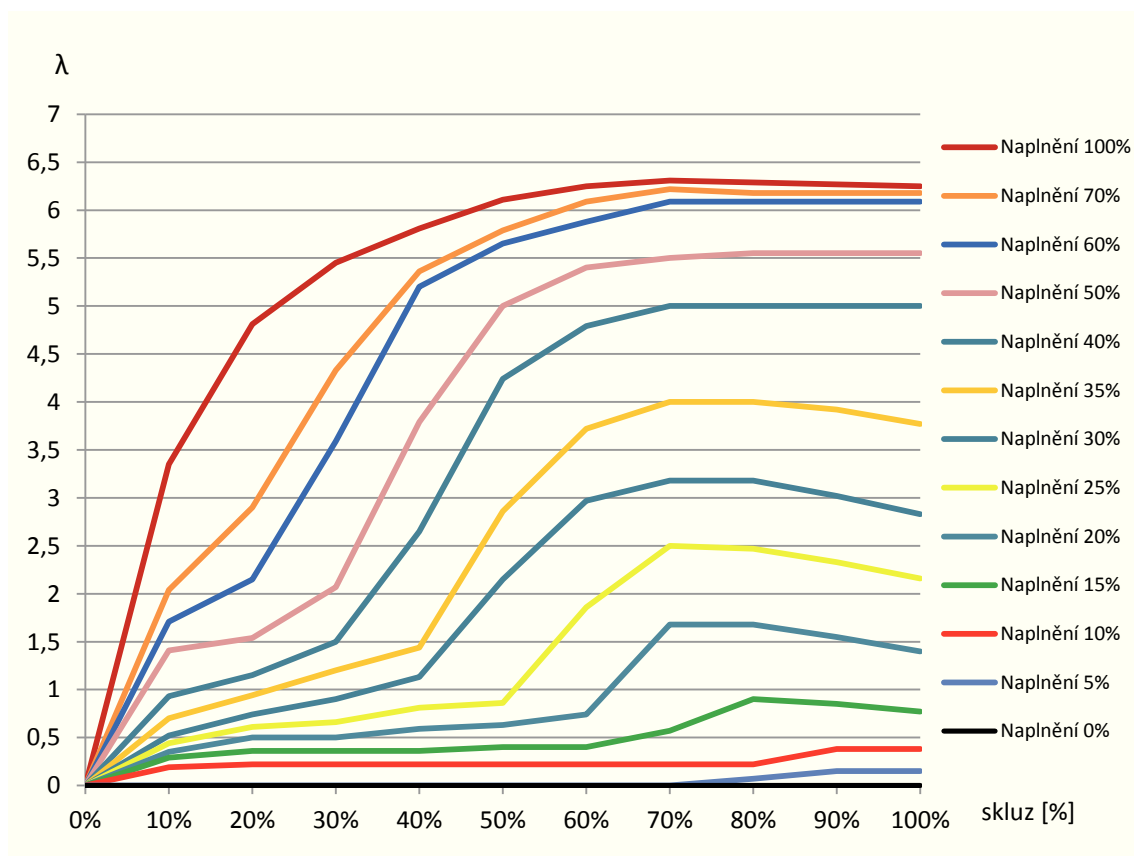
$$10\% \dots 1,476$$

$$7\% \dots \lambda^+$$

$$\lambda^+ = \frac{1,476}{0,1} \cdot 0,07 = 1,0332$$

$$\lambda_v = \lambda_{50\%} + \lambda^+ = 2,758 + 1,0332 = 3,7912$$

Průběh všech interpolačních funkcí je uveden na obrázku 4.3.



Obrázek 4.3 Průběh interpolačních funkcí

Dále je předpokládáno rovnoměrné naplňování spojky v čase. Spojka se zcela naplní v čase  $T_{HS}$ . Hodnota naplnění v závislosti na čase  $t$  pak je dána lineární funkcí:

$$naplnění(t) = \frac{t}{T_{HS}} \cdot 1 \quad (4.6)$$

pro naplnění, vyjádřené poměrnou hodnotou v rozsahu  $\langle 0,1 \rangle$ , resp. funkcí:

$$naplnění(t) = \frac{t}{T_{HS}} \cdot 100\% \quad (4.7)$$

pro naplnění, vyjádřené procenty v rozsahu  $\langle 0,100\% \rangle$ . Obě funkce platí jen do naplnění 100 %, poté již nestoupají. Je patrné, že pro čas  $t = 0$  s bude naplnění 0 % a pro čas  $t = T_{HS}$  bude naplnění 100 %.

### 4.3.1 Limit rozběhu

Při rozběhu mlecího kola by se stav motoru, definovaný otáčkami a příslušným hnacím momentem, měl pohybovat na klesající části charakteristiky, v provozní oblasti, tj. mezi body  $n = 1417,5 \text{ ot/min}$ ,  $M_H = M_B = 12825 \text{ Nm}$  (bod zvratu – maximum charakteristiky) a  $n_s = 1500 \text{ ot/min}$ ,  $M_H = 0$  (běh naprázdno). V opačném případě by rozběh nebyl stabilní. Stanovení dolní hranice časového limitu rozběhu vychází z jednoduché úvahy: Nejkratšího možného času rozběhu lze teoreticky dosáhnout, pokud by soustava byla poháněna maximálním hnacím momentem elektromotoru, tj. momentem zvratu  $M_B$ .

Je-li pohybová rovnice soustavy „mlecí kolo“:

$$I_{CMK} \cdot \varepsilon_v = M_{Hmax} = M_B \quad (4.8)$$

pak maximální úhlové zrychlení této soustavy je:

$$\varepsilon_{vMAX} = \frac{M_{Hmax}}{I_{CMK}} = \frac{12825}{2523} = 5,08 \text{ rad/s}^2 \quad (4.9)$$

Dále je předpokládán rozběh až do jmenovitých otáček  $n_N = 1488 \text{ ot/min}$ , jimž odpovídá úhlová rychlost  $\omega_N = \pi \cdot \frac{n_N}{30} = 155,8 \text{ rad/s}^2$ . Je-li závislost úhlové rychlosti na čase:

$$\omega = \varepsilon \cdot t \quad (4.10)$$

pak čas rozběhu je

$$t_r = \frac{\omega_N}{\varepsilon} = \frac{155,8}{5,08} = 30,6 \text{ s} \doteq 31 \text{ s} \quad (4.11)$$

Dolní časový limit rozběhu je tedy přibližně 31 s, ale protože soustava zdaleka nebude poháněna neustále maximálním momentem, musí být plnění hydrodynamické spojky nastaveno na výrazně delší dobu.

Rychlého rozběhu soustavy mlecího kola, jehož čas by byl blízký 31 s, by teoreticky bylo možné dosáhnout, pokud by byl rozběh řízen automatickým systémem. Z principiálního hlediska by byla zapotřebí tato zařízení: regulační ventil ovládaný například servomotorem, čerpadlo, otáčkové čidlo, počítač, resp. software pro měření a řízení. Systém by pracoval takto: Měřicí čidlo neustále snímá otáčky motoru. Software zkontroluje, zda jsou na hodnotě synchronních otáček  $n_s = 1500 \text{ ot/min}$  a pokud ano,

otevře pomocí servomotoru regulační ventil na maximum a spustí čerpadlo, které začne naplňovat olejem hydrodynamickou spojku. Na počátku naplňování, kdy je skluz hydrodynamické spojky 100 % a naplnění 0 %, je zapotřebí napouštět spojku co nejrychleji, maximálním průtokem, aby bylo dosaženo bodu zvratu co nejdříve. To znamená, že otáčky motoru klesnou z hodnoty  $1500 \text{ ot/min}$  na hodnotu  $1417,5 \text{ ot/min}$ . Software podle měření otáček pozná, v jakém místě momentové charakteristiky se motor nachází. Těsně před dosažením bodu zvratu je již nutné průtok oleje snižovat přivíráním regulačního ventilu, aby nedošlo k překročení momentu zvratu. Nastává proces regulace průtoku, kdy se podle změny otáček motoru mění průtok oleje. Pokud otáčky stoupají z hodnoty  $1417,5 \text{ ot/min}$ , systém zvětší průtok oleje a naopak.

Technicky však tento rozběh není možný, protože elektromotor není konstruován tak, aby pracoval po dlouhou dobu pod zatížením o hodnotě momentu zvratu. Došlo by k enormnímu zahřátí a motor by byl zničen. Použití dodatečného chladicího zařízení v tomto případě z ekonomických důvodů nemá smysl, protože krátká doba rozběhu mlecího kola není prioritou.

### 4.3.2 Výpočet přechodového děje

Rozběh celé soustavy popisují dvě nezávislé pohybové rovnice. Pohybová rovnice soustavy pohonu:

$$I_C \cdot \varepsilon = M_H - M_{HS} \quad (4.12)$$

Pohybová rovnice soustavy mlecího kola:

$$I_{CMK} \cdot \varepsilon_v = M_{HS} - M_O \quad (4.13)$$

kde  $I_C$  je celkový moment setrvačnosti na straně pohonu,  $\varepsilon$  je úhlové zrychlení pohonu,  $M_H$  je hnací moment motoru,  $M_{HS}$  je krouticí moment, přenášený hydrodynamickou spojkou.  $I_{CMK}$  je celkový moment setrvačnosti na straně mlecího kola, redukováný na výstupní hřídel hydrodynamické spojky,  $\varepsilon_v$  je úhlové zrychlení soustavy mlecího kola,  $M_O$  je odporový moment proti pohybu na straně mlecího kola, redukováný na výstupní hřídel spojky. Protože se mlecí kolo bude rozbíhat bez zatížení uhlenu náplní, jde nejspíše o pasivní odpory.

Principem samotného výpočtu přechodového děje je numerická integrace pohybových rovnic, probíhající v integračních krocích. Pohybový stav soustavy

na počátku jednotlivého kroku je dán otáčkami soustavy pohonu  $n$  a otáčkami soustavy mlecího kola  $n_v$  (otáčky na výstupu hydrodynamické spojky). Na počátku rozběhu, tj. v nultém kroku výpočtu, jsou otáčky pohonu rovny synchronním otáčkám motoru při běhu naprázdno  $n_s = 1500 \text{ ot/min}$ . Otáčky soustavy mlecího kola  $n_v$  se rovnají nule.

Řešením pohybových rovnic (4.12) a (4.13) je vypočítán pohybový stav obou nezávislých soustav na konci příslušného integračního kroku.

$$\omega_{(t+\Delta t)} = \omega_{(t)} + \varepsilon_{(t)} \cdot \Delta t \quad (4.14)$$

$$\omega_{v(t+\Delta t)} = \omega_{v(t)} + \varepsilon_{v(t)} \cdot \Delta t \quad (4.15)$$

Kde je  $\Delta t$  tvz. integrační krok.

K uvedenému postupu výpočtu je zapotřebí značně krátká doba integračního kroku  $\Delta t$ . Celkový moment setrvačnosti na straně pohonu  $I_C$  je poměrně malý a zároveň změna otáček motoru je značně rychlý dynamický děj. Navzdory tomu rozběh soustavy mlecího kola je děj pomalý a trvá dlouho. Výpočet tedy vyžaduje extrémně mnoho integračních kroků (přibližně 37000).

### 4.3.3 Úrovně výpočtu

V technické praxi není vždy nutné řešit přesný výpočet, ale často je dostačující výpočet přibližný, který obsahuje zjednodušující předpoklady, které jsou pak zohledněny ve výsledcích. Na řešení přechodového děje je možno nahlížet třemi úrovněmi výpočtu.

Nultá úroveň výpočtu je uvedena v kapitole **4.3.1 Limit rozběhu**, jejímž výsledkem je nejkratší doba rozběhu soustavy 31 s. Tato hodnota zcela jistě není správný výsledek (viz kapitola 4.3.1), avšak slouží k prvnímu přiblížení očekávaného výsledku z přesnějších úrovní výpočtu, tj.  $t_r \gg 31 \text{ s}$ .

První úroveň výpočtu bude nazvána **zjednodušený výpočet**. Ten neřeší soustavu pohonu, ale pouze soustavu mlecího kola. Zjednodušení je obsaženo ve vzorci (4.3) pro výpočet přenášeného momentu hydrodynamické spojky,  $M_{HS} = 2,14 \cdot 10^{-3} \cdot \lambda \cdot n^2$ , kde za  $n$ , což jsou proměnné otáčky motoru v pracovní

oblasti charakteristiky, jsou dosazeny konstantní otáčky, a sice průměr otáček synchronních  $n_s$  a otáček zvratu  $n_{zV}$ :

$$n_{PR} = \frac{n_s + n_{zV}}{2} = \frac{1500 + 1417,5}{2} = 1458,75 \text{ ot/min} \quad (4.16)$$

Taktéž proměnné otáčky  $n$ , figurující ve vzorci pro výpočet skluzu hydrodynamické spojky (4.4), jsou nahrazeny konstantní hodnotou synchronních otáček  $n_s$ , tedy:

$$skluz = \frac{n_s - n_v}{n_s}$$

Zjednodušující předpoklad nahradit proměnné otáčky motoru otáčkami konstantními za účelem získání zjednodušeného výpočtu, plyne z faktu, že se proměnné otáčky motoru mění v malém rozsahu 1417,5 až 1500 ot/min. Výsledek zjednodušeného výpočtu bude porovnán s výsledkem přesnějšího výpočtu, čímž se částečně ověří správnost výsledku přesného výpočtu.

Druhá úroveň výpočtu, kterou již lze považovat za dostatečně přesnou, bude nazvána **přibližný výpočet**. Opět je vypočten přenášený moment hydrodynamické spojky  $M_{HS} = 2,14 \cdot 10^{-3} \cdot \lambda \cdot n^2$ , avšak za  $n$  jsou dosazeny otáčky motoru plynoucí z momentové charakteristiky (viz obrázek 3.6.). Přenášený moment  $M_{HS}$  strany mlecího kola působí jako odporový moment na straně pohonu,  $M_{HS} = M_o$ . Dále je uvažováno, že hnací moment motoru  $M_H$  se rovná odporovému momentu  $M_o$ , tudíž momentu  $M_{HS}$ . Tedy  $M_{HS} = M_H$ , kde  $M_H$  je definováno Klossovou funkcí (3.9).

$$M_{HS} = \frac{2 \cdot M_{zV}}{\frac{s}{s_{zV}} + \frac{s_{zV}}{s}} \quad (4.17)$$

Řešením této rovnice je získána úhlová rychlost motoru, resp. otáčky motoru, které jsou v dalším kroku dosazeny pro výpočet přenášeného momentu spojky  $M_{HS}$ , dle (4.3). Pohybová rovnice strany pohonu v tomto výpočtu není řešena, protože moment setrvačnosti strany pohonu  $I_C$  je proti momentu setrvačnosti strany mlecího kola  $I_{CMK}$  značně malý a vliv zrychlení strany pohonu  $\varepsilon$  lze zanedbat.



Požadované otáčky motoru, které jsou kořenem rovnice (4.17), figurující ve skluzu motoru  $s$ , je možné získat pouze iteračním výpočtem, který by bylo nutné v EXCELU naprogramovat. Protože ale existuje ještě přesnější řešení, kde jsou řešeny obě pohybové rovnice soustavy, nebyl tento přibližný výpočet v této práci realizován. Pro toto přesnější řešení budeme používat v bakalářské práci označení **přesný výpočet**. Přesný výpočet je třetí úroveň výpočtu a jeho výsledky lze považovat za nejpřesnější, protože jsou získány řešením obou pohybových rovnic (4.12), (4.13).

#### 4.3.4 Zjednodušený výpočet

Pro první přiblížení celkové doby naplňování hydrodynamické spojky byl nejprve realizován zjednodušený výpočet s poměrně delším integračním krokem  $\Delta t = 0,01 \text{ s}$ . Zjednodušení je popsáno v kapitole 4.3.3.

Výpočet byl sestaven formou tabulky v EXCELU, v souboru s již předem vytvořeným podprogramem pro výpočet parametru  $\lambda$  z (4.3) pro libovolnou hodnotu skluzu a naplnění (viz tabulka 4.2<sup>5</sup>). Tabulku tvoří 12 sloupců, tj. číslo kroku  $i$ , doba rozběhu  $t$ , výstupní úhlová rychlost  $\omega_v$ , výstupní otáčky  $n_v$ , skluz hydrodynamické spojky  $s_{HS}$ , naplnění hydrodynamické spojky, parametr  $\lambda$ , přenášený moment spojky  $M_{HS}$ , odporový moment  $M_o$ , výsledný hnací moment soustavy mlecího kola  $M_{VMK}$ , úhlové zrychlení  $\varepsilon_v$ , úhel natočení  $\varphi_v$ .

Do výpočtu byly dosazeny tyto vstupní parametry:

- doba plnění hydrodynamické spojky  $T_{HS}$ , hodnota odhadnuta s ohledem na limit rozběhu (viz kapitola 4.3.1),  $T_{HS} \gg 31 \text{ s}$ , a postupně upravována na konečnou hodnotu  $T_{HS} = 120 \text{ s}$
- délka integračního kroku  $\Delta t = 0,01 \text{ s}$ .
- odporový moment  $M_o = 500 \text{ N} \cdot \text{m}$ , působící proti pohybu, zvoleno cca 10 % jmenovitého momentu  $M_N$
- vstupní synchronní otáčky motoru  $n_s = 1500 \text{ ot/min}$ , počáteční otáčky mlecího kola  $n_{0v} = 0 \text{ ot/min}$
- celkový moment setrvačnosti soustavy mlecího kola  $I_{CMK} = 2523 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$

---

<sup>5</sup> Tabulka 4.2 je z rozměrových důvodů rozdělena a zobrazena jako dvě tabulky, přičemž první dva sloupce obou tabulek jsou totožné. Sloupec úhel natočení není v tabulce zobrazen.

V nultém kroku výpočtu pro počáteční čas  $t_0 = 0 \text{ s}$  jsou zadány počáteční podmínky: nulová výstupní úhlová rychlost  $\omega_{0v} = 0 \text{ rad/s}$ , resp. nulové výstupní otáčky  $n_{0v} = 0 \text{ ot/min}$  a nulový úhel natočení  $\varphi_{0v} = 0 \text{ rad}$ . V prvním, resp. i-tém kroku je doba rozběhu  $t_i = t_{i-1} + \Delta t$ , kde  $\Delta t = 0,01 \text{ s}$ . Skluz hydrodynamické spojky je vypočten podle (4.4), kde vstupní otáčky  $n = n_s$ . Naplnění je určeno pro zadanou hodnotu  $T_{HS}$  podle (4.6) resp. (4.7). Hodnota naplnění nesmí být větší než 1, resp. 100 %. Pokud však je podíl  $t_i/T_{HS} > 1$ , do buňky je pomocí funkce KDYZ přiřazena hodnota 1. Pro skluz a naplnění v daném kroku je pomocí podprogramu vypočten parametr  $\lambda$ . Dále je pomocí vztahu (4.3) získán přenášený moment spojky  $M_{HS}$ . Sloupec odporový moment  $M_o$  obsahuje taktéž podmínku realizovanou funkcí KDYZ: pokud jsou otáčky výstupu v kterémkoli kroku nulové, je  $M_o$  roven nule. Moment  $M_{VMK}$  se rovná rozdílu  $M_{HS}$  a  $M_o$ . Úhlové zrychlení  $\varepsilon_v$  je opět pro malé  $\Delta t$  možné považovat za konstantní a je určeno jako podíl momentu  $M_{VMK}$  a celkového momentu setrvačnosti  $I_{CMK}$ .

$$\varepsilon_v = \frac{M_{VMK}}{I_{CMK}} = \frac{M_{HS} - M_o}{I_{CMK}} \quad (4.18)$$

Výstupní úhlová rychlost  $\omega_{iv}$  je vypočtena dle známého vztahu:  $\omega_{iv} = \omega_{i-1v} + \varepsilon_{i-1v} \cdot \Delta t$ , poté převedena na výstupní otáčky  $n_v$ . Úhel natočení je dán vztahem  $\varphi_{iv} = \varphi_{i-1v} + \omega_{i-1v} \cdot \Delta t + 1/2 \cdot \varepsilon_{i-1v} \cdot \Delta t^2$ , kde  $\varphi_{i-1v}$ ,  $\omega_{i-1v}$ ,  $\varepsilon_{i-1v}$  jsou veličiny předchozího kroku.

Číslo kroku	Čas	Výstupní úhlová rychlost	Výstupní otáčky	Skluz	Naplnění
$i [-]$	$t [-]$	$\omega_v [\text{rad/s}]$	$n_v [\text{ot/min}]$	$s_{HS} [-]$	naplnění <sub>(t)</sub> [-]
0	0	$=\omega_0=0$	$=(\omega_0/(2\cdot\pi))\cdot 60$	$=(n_s-n_{v0})/n_s$	$=t_0/T_{HS}$
1	$=t_0+\Delta t=0,01$	$=\omega_0+\varepsilon_0\cdot\Delta t$	$=(\omega_1/(2\cdot\pi))\cdot 60$	$=(n_s-n_{v1})/n_s$	$=t_1/T_{HS}$
2	0,02	...	...	...	...
3	0,03	...	...	...	...
...	...	...	...	...	...
11999	119,99	156,54876	1494,930497	0,0033797	0,999916667
12000	120,00	156,54882	1494,931084	0,0033793	1

Tabulka 4.2 Zjednodušený výpočet

Číslo kroku	Čas	Parametr spojky	Přenášený moment spojky	Odporový moment	Výsledný moment mlecího kola	Úhlové zrychlení na výstupu
$i [-]$	$t [-]$	$\lambda [-]$	$M_{HS} [\text{Nm}]$	$M_o [\text{Nm}]$	$M_{VMK} [\text{Nm}]$	$\varepsilon_v [\text{rad/s}^2]$
0	0	=program	$=0,00214\cdot\lambda_0\cdot n_{PR}^2$	=KDYŽ... = 0	$=M_{HS,1} - M_{O,1}$	$=M_{VMK,0}/I_{CKM}$
1	$=t_0+\Delta t=0,01$	=program	$=0,00214\cdot\lambda_1\cdot n_{PR}^2$	=KDYŽ... = 0	$=M_{HS,0} - M_{O,1}$	$=M_{VMK,1}/I_{CKM}$
2	0,02	...	...	=KDYŽ... = 500	...	...
3	0,03	...	...	...	...	...
...	...	...	...	...	...	...
11999	119,99	0,1132066	515,5221118	500	15,5221117	0,006152244
12000	120,00	0,1132058	515,5183662	500	15,5183662	0,006150759

Tabulka 4.2 Zjednodušený výpočet – pokračování tabulky

### 4.3.5 Přesný výpočet

Přesný výpočet řeší numerickou integrací obě pohybové rovnice (4.12), (4.13). Výpočet byl realizován, obdobně jako zjednodušený výpočet, v EXCELU v podobě tabulky (viz tabulka 4.3<sup>6</sup>). Tabulka se skládá z 16 sloupců: číslo kroku  $i$ , doba rozběhu  $t$ , otáčky vstup (soustava pohon)  $n$ , otáčky výstup (soustava mlecí kolo)  $n_v$ , naplnění, skluz  $s_{HS}$ , parametr  $\lambda$ , úhlová rychlost - vstup  $\omega$ , úhlová rychlost – výstup  $\omega_v$ , přenášený moment spojky  $M_{HS}$ , odporový moment  $M_o$ , hnací moment motoru  $M_H$ ,

<sup>6</sup> Tabulka je z rozměrových důvodů rozdělena a zobrazena jako tři tabulky, přičemž první dva sloupce jsou vždy totožné.

skluz motoru  $s$ , úhlové zrychlení vstup  $\varepsilon$ , úhlové zrychlení výstup  $\varepsilon_v$ , úhlová dráha soustavy mlecí kolo  $\varphi_v$ .

Vstupní parametry výpočtu:

- doba plnění hydrodynamické spojky  $T_{HS} = 120 \text{ s}$ , jejíž hodnota byla dle potřeby měněna
- délka integračního kroku  $\Delta t = 0,003 \text{ s}$ .
- odporový moment  $M_o = 500 \text{ N} \cdot \text{m}$
- vstupní synchronní otáčky motoru  $n_s = 1500 \text{ ot/min}$ , počáteční otáčky mlecího kola  $n_{0v} = 0 \text{ ot/min}$
- celkový moment setrvačnosti soustavy mlecího kola  $I_{CMK} = 2523 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$
- celkový moment setrvačnosti soustavy pohonu  $I_C = 26,1 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$

Do nultého kroku výpočtu s počátečním časem  $t_0 = 0 \text{ s}$  jsou zadány počáteční podmínky: vstupní otáčky  $n = 1500 \text{ ot/min}$ , resp. vstupní úhlová rychlost  $\omega = 157,0796 \text{ rad/s}$ , nulové výstupní otáčky  $n_{0v} = 0 \text{ ot/min}$ , resp. nulová výstupní úhlová rychlost  $\omega_{0v} = 0 \text{ rad/s}$ , nulový úhel natočení soustavy mlecího kola  $\varphi_{0v} = 0 \text{ rad}$ . Doba rozběhu je v prvním, resp.  $i$ -tém kroku  $t_i = t_{i-1} + \Delta t$ , kde  $\Delta t = 0,003 \text{ s}$ . Z otáček na vstupu a výstupu je vypočten skluz hydrodynamické spojky dle vztahu (4.4), kde vstupní otáčky  $n$  jsou okamžité otáčky motoru a  $n_v$  jsou otáčky soustavy mlecího kola. Naplnění je opět určeno pro zadanou hodnotu  $T_{HS}$  podle (4.6) resp. (4.7) a hodnota nesmí být větší než jedna, což je zajištěno funkcí KDYŽ. Pro dané naplnění a skluz hydrodynamické spojky je v každém kroku podprogramem určen parametr  $\lambda$ . Poté je možno spočítat přenášený moment  $M_{HS}$  pomocí vztahu (4.3). Hodnota odporového momentu  $M_o = 500 \text{ N} \cdot \text{m}$  je do příslušné buňky přiřazena funkcí KDYŽ, pokud jsou otáčky soustavy mlecího kola nenulové. Dále je vypočítán proměnný skluz motoru  $s$  podle vztahu (3.12), kde  $\omega$  je okamžitá úhlová rychlost motoru a  $\omega_s$  je úhlová rychlost synchronních otáček. Hnací moment motoru  $M_H$  je vypočten Klossovou funkcí (3.9). Pokud je však skluz motoru  $s$  roven nule, nastává v Klossově vztahu „dělení nulou“. Proto je pro určení hnacího momentu  $M_H$  vytvořena podmínka realizovaná funkcí KDYŽ: Pokud je skluz motoru  $s = 0$ , je moment  $M_H$  také roven nule, což odpovídá momentové charakteristice motoru (viz obrázek 3.2).

Nyní je možné vypočítat úhlová zrychlení, která pro malé  $\Delta t$  považujeme za konstantní. Úhlové zrychlení vstupu  $\varepsilon$  je určeno z pohybové rovnice (4.12) jako podíl

rozdílu momentů  $M_H$ ,  $M_{HS}$  a celkového momentu setrvačnosti soustavy pohonu  $I_C$ . Obdobně úhlové zrychlení výstupu  $\varepsilon_v$  z pohybové rovnice (4.13) je vypočteno jako podíl rozdílu momentů  $M_{HS}$ ,  $M_o$  a celkového momentu setrvačnosti soustavy mlecího kola  $I_{CMK}$ .

$$\varepsilon = \frac{M_H - M_{HS}}{I_C} \quad (4.19)$$

$$\varepsilon_v = \frac{M_{HS} - M_o}{I_{CMK}} \quad (4.20)$$

Získaná úhlová zrychlení  $\varepsilon, \varepsilon_v$  použijeme pro určení úhlových rychlostí  $\omega, \omega_v$ , resp. vstupních a výstupních otáček  $n, n_v$ , a pro úhlovou dráhu  $\varphi_v$  dle známých vztahů.

Výpočet vstupní úhlové rychlosti  $\omega_i$  je ošetřen podmínkou maximální hodnoty, kdy  $\omega_i$  nesmí být větší než úhlová rychlost synchronních otáček motoru  $\omega_s$ ,  $\omega_i \nprec \omega_s$ . Pokud je  $\omega_i > \omega_s$ , do výpočtu je dosazena hodnota  $\omega_s$ . Taktéž výpočet výstupní úhlové rychlosti obsahuje dvě podmínky: Když je v některém početním kroku výstupní úhlová rychlost menší než nula,  $\omega_{vi} < 0$ , je do výpočtu dosazena nulová úhlová rychlost,  $\omega_{vi} = 0$ . A pokud je v některém početním kroku výstupní úhlová rychlost větší než vstupní úhlová rychlost,  $\omega_{vi} > \omega_i$ , je za výstupní úhlovou rychlost dosazena hodnota vstupní úhlové rychlosti daného početního kroku,  $\omega_{vi} = \omega_i$ .

Číslo kroku	Čas	Vstupní úhlová rychlost	Vstupní otáčky	Výstupní úhlová rychlost	Výstupní otáčky	Skluz
i [-]	t [-]	$\omega$ [rad/s]	n [ot/min]	$\omega_v$ [rad/s]	$n_v$ [ot/min]	$s_{HS}$ [-]
0	0	$=\omega_0=157,0796$	$=n_0=1500$	$=\omega_{0v}=0$	$=(\omega_{0v}/(2\cdot\pi))\cdot 60$	$=(n_0-n_{0v})/n_0$
1	$=t_0+\Delta t=0,003$	$=\omega_0+\epsilon_0\cdot\Delta t$	$=(\omega_1/(2\cdot\pi))\cdot 60$	$=\omega_{0v}+\epsilon_{0v}\cdot\Delta t$	$=(\omega_{1v}/(2\cdot\pi))\cdot 60$	$=(n_1-n_{1v})/n_1$
2	0,006	$=\omega_1+\epsilon_1\cdot\Delta t$	$=(\omega_2/(2\cdot\pi))\cdot 60$	$=\omega_{1v}+\epsilon_{1v}\cdot\Delta t$	$=(\omega_{2v}/(2\cdot\pi))\cdot 60$	$=(n_2-n_{2v})/n_2$
3	0,009	...	...	...	...	...
...	...	...	...	...	...	...
36667	110,001	156,905555	1498,337681	156,40191	1493,52824	0,003209851
36668	110,004	156,905556	1498,337692	156,40193	1493,52843	0,003209732

Tabulka 4.3 Přesný výpočet

Číslo kroku	Čas	Naplnění	Parametr spojky	Přenášený moment spojky	Odporový moment	Skluz motoru
i [-]	t [-]	$naplnění_{(t)}$ [-]	$\lambda$ [-]	$M_{HS}$ [Nm]	$M_o$ [Nm]	s [-]
0	0	$=t_0/T_{HS}$	=program	$=0,00214\cdot\lambda_0\cdot n_0^2$	=KDYŽ... = 0	$=(\omega_s-\omega_0)/\omega_s=0$
1	$=t_0+\Delta t=0,003$	$=t_1/T_{HS}$	=program	$=0,00214\cdot\lambda_1\cdot n_1^2$	=KDYŽ... = 0	$=(\omega_s-\omega_1)/\omega_s$
2	0,006	$=t_2/T_{HS}$	=program	$=0,00214\cdot\lambda_1\cdot n_2^2$	=KDYŽ... = 500	$=(\omega_s-\omega_2)/\omega_s$
3	0,009	...	...	...	...	...
...	...	...	...	...	...	...
36667	110,001	1	0,107529999	516,61001	500	0,00111
36668	110,004	1	0,107526033	516,59097	500	0,00111

Tabulka 4.3 Přesný výpočet – pokračování tabulky

Číslo kroku	Čas	Hnací moment motoru	Úhlové zrychlení na vstupu	Úhlové zrychlení na výstupu	Úhel natočení
i [-]	t [-]	$M_H$ [Nm]	$\epsilon$ [rad/s <sup>2</sup> ]	$\epsilon_v$ [rad/s <sup>2</sup> ]	$\phi_v$ [rad]
0	0	$=(2M_{zv})/((s_0/s_{zv})+(s_{zv}/s_0))$	$=(M_{H,0}-M_{HS,0})/I_C$	$=(M_{HS,0}-M_{o,0})/I_{CKM}$	$=\phi_{0v}=0$
1	$=t_0+\Delta t=0,003$	$=(2M_{zv})/((s_1/s_{zv})+(s_{zv}/s_1))$	$=(M_{H,1}-M_{HS,1})/I_C$	$=(M_{HS,1}-M_{o,1})/I_{CKM}$	$=\phi_{iv}+\omega_{iv}\cdot\Delta t+1/2\cdot\epsilon_{iv}\cdot\Delta t^2$
2	0,006	$=(2M_{zv})/((s_2/s_{zv})+(s_{zv}/s_2))$	$=(M_{H,2}-M_{HS,2})/I_C$	$=(M_{HS,2}-M_{o,2})/I_{CKM}$	...
3	0,009	...	...	...	...
...	...	...	...	...	...
36667	110,001	516,62028	0,00039	0,00658	17097,53539
36668	110,004	516,61678	0,00099	0,00658	17098,00611

Tabulka 4.3 Přesný výpočet – pokračování tabulky

### 4.3.6 Praktické použití sestavených výpočtů

Sestavené výpočty, jak zjednodušený, tak i přesný, pracují téměř samostatně jako výpočtový program. Program, resp. výpočet, obsahuje několik vstupních parametrů popsaných v kapitole 4.3.3 až 4.3.5. Hlavním vstupním parametrem je však čas naplnění hydrodynamické spojky  $T_{HS}$ . Pro každý libovolný čas  $T_{HS}$  bude získán jiný výsledek. Tímto výsledkem je průběh momentu<sup>7</sup> v čase, jehož hodnota, v kterémkoli kroku, nesmí překročit hodnotu momentu zvratu,  $M_{ZV} = 12825 \text{ N} \cdot \text{m}$ . Zároveň je ale požadována nejkratší možná doba rozběhu mlecího kola, a proto je nutné se k hodnotě momentu zvratu co nejvíce přiblížit.

Pokud pro zadanou dobu  $T_{HS}$  dojde k překročení momentu zvratu, stav motoru se nebude nacházet v pracovní oblasti, ale v oblasti rozběhu. Pro oblast rozběhu není sestavený výpočet platný, protože využívá k získání hodnot hnacího momentu Klossovu funkci, která je platná pouze v oblasti pracovní. Proto je zapotřebí tuto dobu  $T_{HS}$  prodloužit. Tím bude zajištěno, že motor se bude nacházet v pracovní oblasti momentové charakteristiky a že sestavený výpočet lze použít.

Protože výpočet obsahuje více než 37000 integračních kroků, kde jeden integrační krok znamená v EXCELU jeden řádek, je pro lepší orientaci do zvolené buňky vložena funkce MAX, která vybere maximální hodnotu hnacího momentu motoru z příslušného sloupce. Hodnota je pak porovnána s hodnotou momentu zvratu a podle potřeby je upraven čas plnění hydrodynamické spojky  $T_{HS}$ . Zkrácené tabulky obou výpočtů s konkrétními hodnotami jsou uvedeny v příloze č. 2 a č. 3<sup>8</sup>.

---

<sup>7</sup> Ve zjednodušeném výpočtu je to průběh momentu spojky  $M_{HS}$ .

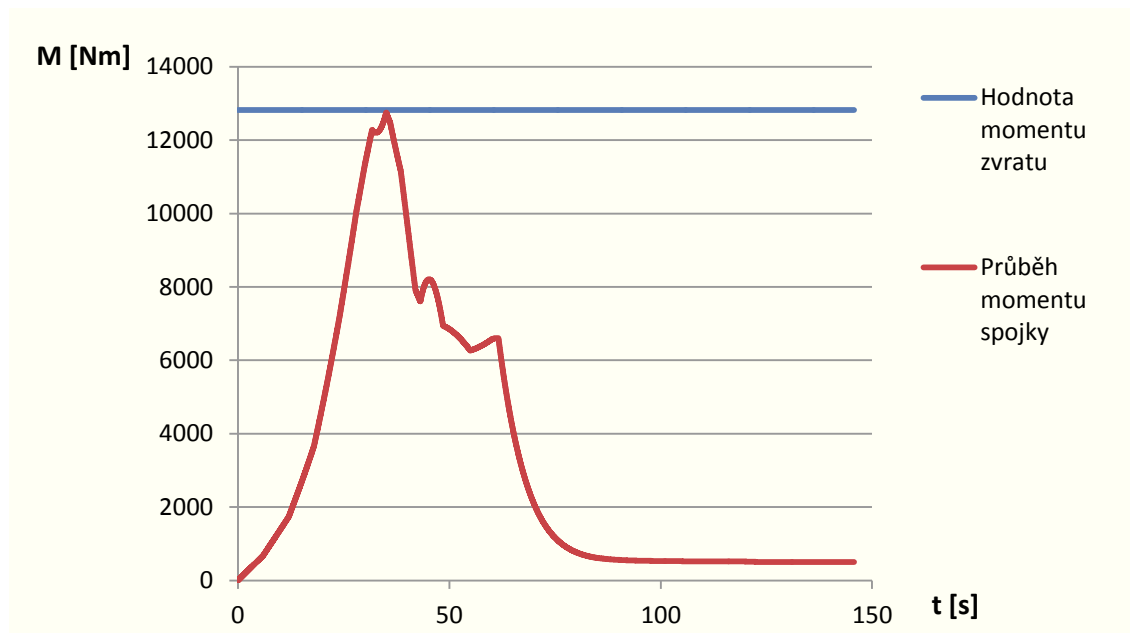
V přesném výpočtu je to průběh hnacího momentu elektromotoru  $M_H$ .

<sup>8</sup> V příloze č. 3 je v tabulce z rozměrových důvodů vynechán sloupec úhel natočení a skluz motoru.

## 5. POPIS VÝSLEDKŮ NUMERICKÉHO ŘEŠENÍ

### 5.1 Výsledky zjednodušeného výpočtu

Postupným upravováním doby plnění hydrodynamické spojky byla zjištěna, v rámci zjednodušeného výpočtu, nejkratší možná doba plnění  $T_{HS} = 119,17 \text{ s} \doteq 120 \text{ s}$ . Hodnota byla zaokrouhlena na vyšší hodnotu, aby nebyl překročen moment zvratu. Pro čas plnění  $T_{HS} = 119,17 \text{ s}$  je dosaženo přesně hodnoty momentu zvratu  $M_{ZV} = 12825 \text{ N} \cdot \text{m}$ . Pro  $T_{HS} = 120 \text{ s}$  je pak maximální hodnota momentu spojky  $M_{HS} = 12755,4 \text{ N} \cdot \text{m}$ . Průběh přenášeného momentu hydrodynamické spojky pro  $T_{HS} = 120 \text{ s}$  je na obr. 5.1 Výsledná hodnota  $T_{HS} = 120 \text{ s}$  dobře souhlasí s předpokladem  $T_{HS} \gg 31 \text{ s}$ , uvedeným v kap. 4.3.1.

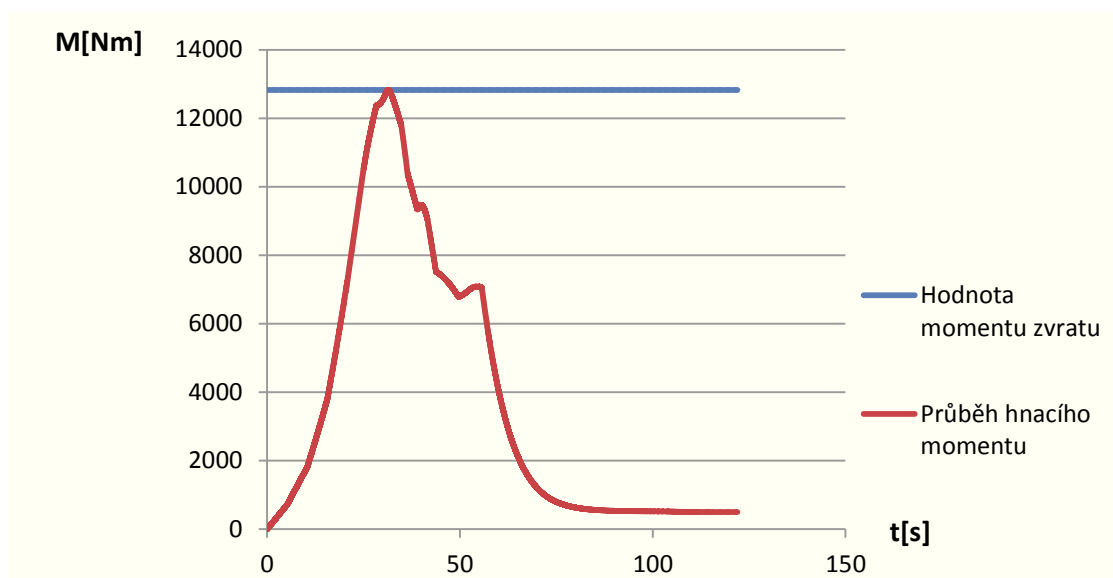


Obrázek 5.1 Průběh momentu spojky  $M_{HS}$



## 5.2 Výsledky přesného výpočtu

První přesný výpočet byl proveden pro hodnotu  $T_{HS} = 120$  s, která byla zjištěna výpočtem zjednodušeným. Maximální hnací moment motoru v tomto případě činil  $M_H = 11995$  N·m. Proto byly provedeny další výpočty pro přiblížení hnacího momentu motoru k hodnotě momentu zvratu. Postupným zkracováním doby  $T_{HS}$  byla zjištěna nejkratší možná doba  $T_{HS} = 104$  s, kdy byla hodnota hnacího momentu motoru téměř shodná s hodnotou momentu zvratu. Průběh hnacího momentu v čase pro  $T_{HS} = 104$  s je na obrázku 5.2.



Obrázek 5.2 Průběh hnacího momentu  $M_H$

Zjištěný čas  $T_{HS} = 104$  s nelze pokládat za absolutně správný výsledek, resp. nelze jej označit za nejkratší možný čas naplňování hydrodynamické spojky. Není možné s jistotou tvrdit, že v tomto čase nebude hodnota momentu zvratu překročena, protože výpočet je zatížen chybami.

Nejpodstatnější chybou je fakt, že výpočet vychází z grafického záznamu hodnot parametru  $\lambda$  (viz kapitola 4.2, obrázek 4.2), který popisuje chování spojky při jejím naplňování. Tento proces je děj složitý, vystupuje v něm prvek nahodilosti a získat dostatečně přesný matematický popis je téměř nemožné. Grafický záznam je tedy jen přibližným popisem chování hydrodynamické spojky a jeho použití vnáší do výpočtu celkovou nejistotu správnosti výsledku.

Mezi další chyby patří digitalizace grafického záznamu hodnot parametru  $\lambda$  a následné získání parametru  $\lambda$  pro libovolnou hodnotu skluzu a naplnění pomocí lineární interpolace, což nemusí odpovídat realitě. Jistou chybu do výpočtu zavádí zjednodušující předpoklad, kdy hodnota momentu setrvačnosti olejové náplně se považuje během naplňování za konstantní a je rozdělena na dvě poloviny, které jsou započteny do celkového momentu setrvačnosti soustavy pohonu a soustavy mlecího kola. Také hodnota odporového momentu  $M_o = 500 \text{ N} \cdot \text{m}$  byla odhadnuta, protože odpory nejsou známy, což opět znamená chybu výsledků.

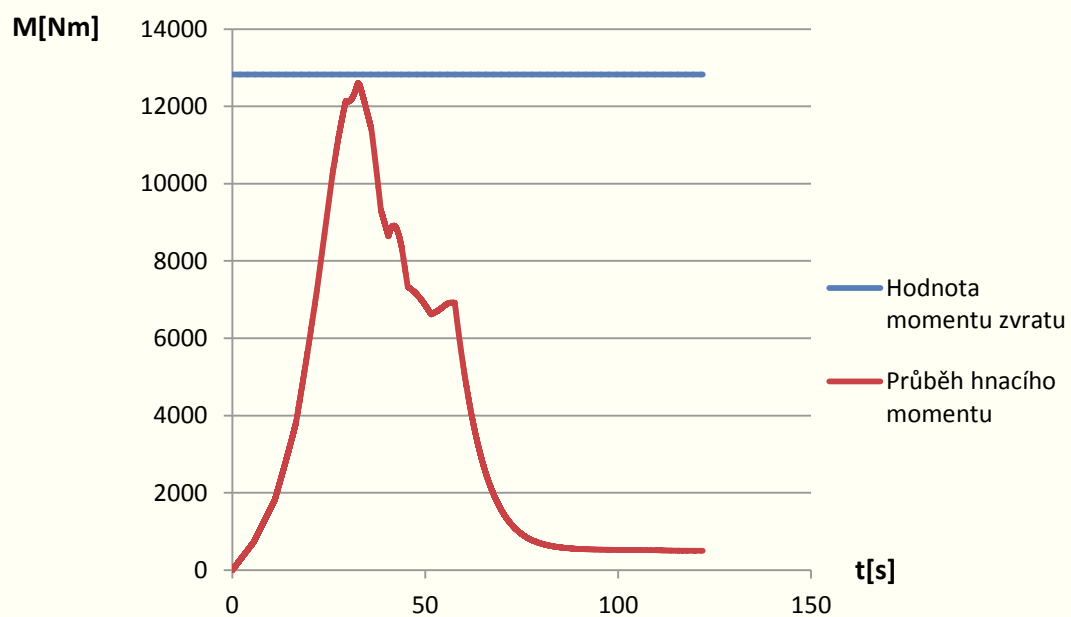
Z těchto důvodů je nutné zvolit dobu naplňování hydrodynamické spojky delší než  $104 \text{ s}$ ,  $T_{HS} > 104 \text{ s}$ , avšak není zapotřebí stanovit pevnou hodnotu. V rámci jisté „bezpečnosti“ je navržen časový interval  $T_{HS} \in \langle 110; 120 \rangle \text{ s}$ . Napouštění hydrodynamickou spojku déle než  $120 \text{ s}$  by bylo neefektivní. Rychlost plnění lze vyjádřit formou objemového průtoku  $Q \text{ [m}^3/\text{s]}$ :

$$Q = \frac{V}{T_{HS}} \quad (5.1)$$

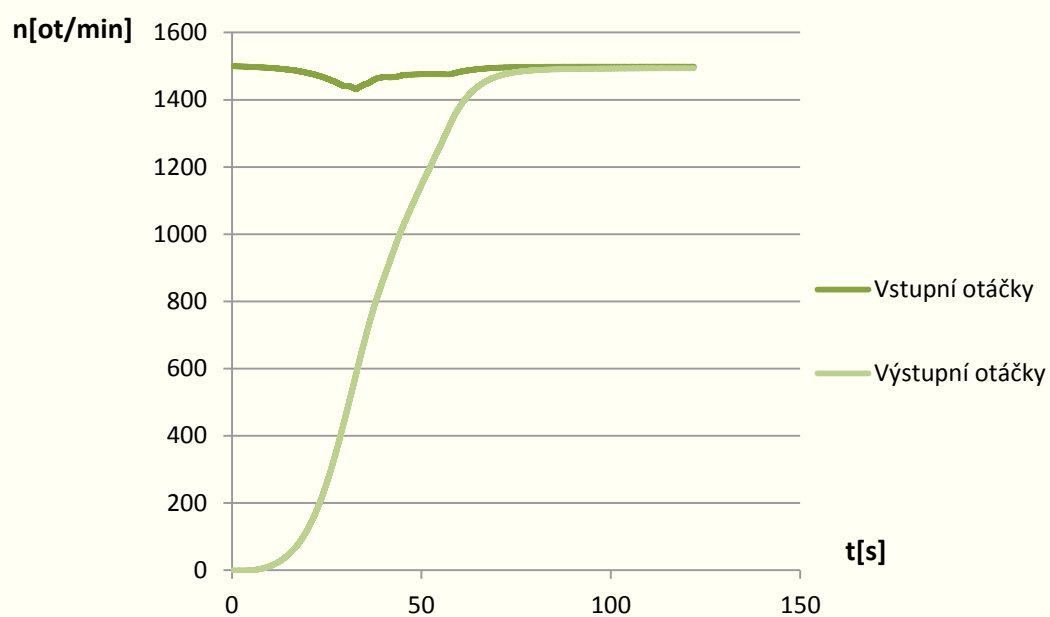
kde  $V$  je objem olejové náplně a  $T_{HS}$  je doba plnění spojky olejem.

Na obrázcích jsou uvedeny průběhy veličin v čase pro dobu naplnění  $T_{HS} = 110 \text{ s}$ . Průběh hnacího momentu motoru  $M_H$  je na obrázku 5.3. Průběh vstupních  $n$  a výstupních otáček  $n_v$  je na obrázku 5.4. Na obrázku 5 je uveden průběh naplnění, skluzu a parametru  $\lambda$  hydrodynamické spojky. Obrázek 5.6 ukazuje průběh hnacího momentu  $M_H$  pro čas  $T_{HS} = 150 \text{ s}$ .

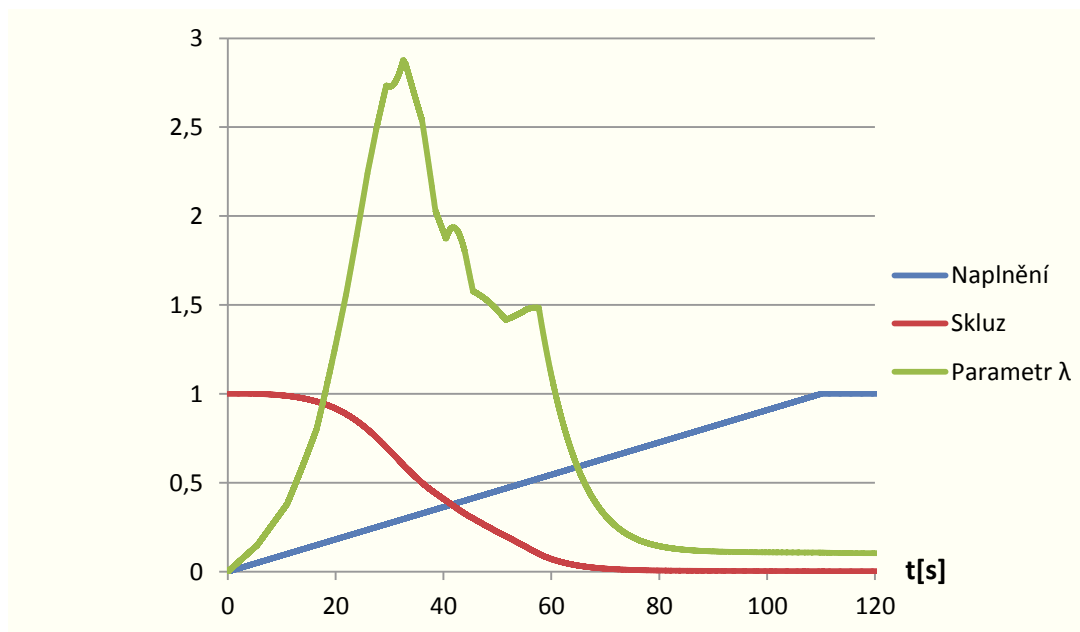
Výpočtem bylo dále zjištěno, že za čas  $T_{HS} = 110 \text{ s}$  bude úhlová dráha soustavy „mlecí kolo“, resp. výstupního hřídele hydrodynamické spojky  $\varphi_v \doteq 11188 \text{ rad}$ , tj. přibližně 1781 otočení. Přepočtem přes převodový poměr byl určen počet otočení mlecího kola: 817 otočení.



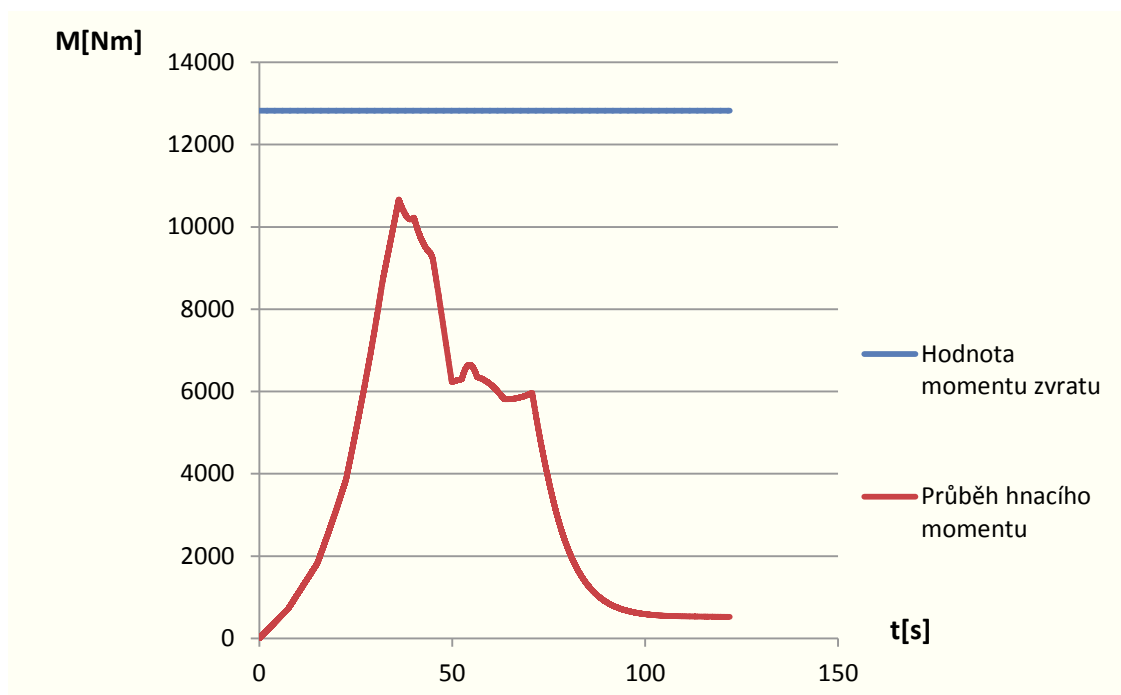
Obrázek 5.3 Průběh hnacího momentu  $M_H$  (THS = 110s)



Obrázek 5.4 Průběh vstupních a výstupních otáček



Obrázek 5.5 Průběh naplnění, skluzu a parametru  $\lambda$



Obrázek 5.6 Průběh hnacího momentu  $M_H$  (THS = 150s)

## 6. ZÁVĚR

Bakalářská práce se zabývá analýzou rozběhu soustavy mlecího kola elektrárny. Soustavu mlecího kola tvoří elektromotor, pružná hřídelová spojka, hydrodynamická spojka, druhá pružná hřídelová spojka, převodovka a mlecí kolo. Cílem práce je navrzení rychlosti naplňování hydrodynamické spojky, při které bude čas plnění nejkratší a stav motoru bude v pracovní oblasti momentové charakteristiky.

Nejprve byla řešena doba rozběhu motoru naprázdno. Přibližným výpočtem, ve kterém byl použit konstantní hnací moment, byl zjištěn čas rozběhu  $t \doteq 0,68 \text{ s}$ . Výpočet přesnější, nazvaný nerovnoměrný rozběh jednohmotové soustavy, zahrnoval vliv momentové charakteristiky motoru. Momentová charakteristika byla digitalizována a aproximována. Aproximací byla získána hodnota hnacího momentu při libovolných otáčkách motoru. Numerickou integrací pohybové rovnice byla zjištěna doba rozběhu  $t \doteq 0,63 \text{ s}$ . Za tuto dobu se motor roztočí z klidu na hodnotu synchronních otáček  $n_s = 1500 \text{ ot/min}$ .

Pro řešení rozběhu mlecího kola byl stanoven dvouhmotový výpočtový model. Celá soustava byla rozdělena na soustavu „pohon“ a soustavu „mlecí kolo“. Naplňováním hydrodynamické spojky se začne přenášet hnací moment a soustava „mlecí kolo“ se začne roztáčet. Naplňování je rovnoměrné v čase. Schopnost hydrodynamické spojky přenášet moment, v závislosti na skluzu a naplnění, popisuje grafický záznam parametru  $\lambda$ , který bylo nutné digitalizovat a aproximovat. Pro získání hodnoty přenášeného momentu byl sestaven „podprogram“, který pro libovolný skluz a naplnění hydrodynamické spojky určil pomocí lineární interpolace parametr spojky  $\lambda$ .

Poté bylo možné řešit rozběh mlecího kola, který popisují dvě pohybové rovnice – pohybová rovnice pro soustavu „pohon“ a pohybová rovnice pro soustavu „mlecí kolo“. Pohybové rovnice byly řešeny opět numerickou integrací (přibližně 37000 integračních kroků). Hlavním vstupním parametrem sestaveného výpočtu byla doba plnění hydrodynamické spojky  $T_{HS}$ . Pro danou dobu  $T_{HS}$  byl získán průběh hnacího momentu elektromotoru v čase. Jeho maximální hodnota nesměla přesáhnout hodnotu momentu zvratu elektromotoru, protože stav motoru by se už nenacházel v pracovní oblasti momentové charakteristiky a rozběh mlecího kola by nebyl plynulý.

Postupnou úpravou doby  $T_{HS}$  bylo dosaženo mezní hodnoty  $T_{HS} = 104 \text{ s}$ , ve které se maximální hodnota průběhu hnacího momentu téměř rovnala momentu zvratu. Protože je však výpočet zatížen chybami, nelze tuto hodnotu brát jako nejkratší možnou. Čas plnění hydrodynamické spojky byl tedy stanoven v podobě doporučeného intervalu:  $T_{HS} = \langle 110; 120 \rangle \text{ s}$ .

## PŘEHLED POUŽITÉ LITERATURY

- [1] BOLEK, A. KOCHMAN, J. a kol. *Části strojů. I. svazek. 5. přepracované vyd.*, 1. vyd. v SNTL. Praha: SNTL - Nakladatelství technické literatury, 1989. ISBN 80-03-00046-7.
- [2] BROUSIL, J. SLAVÍK, J. ZEMAN, V. *Dynamika*. Praha: SNTL – Nakladatelství technické literatury, 1989. ISBN 80-03-00164-1
- [3] ČADIL, F. ANDERLE, V. HOLAN, J. KULE, L. *Elektrické pohony*. Praha: SNTL – Nakladatelství technické literatury, 1976. ISBN 04-538-76.
- [4] HRADÍLEK, Zdeněk. *Elektroenergetika*. 1. vyd. Ostrava: Vysoká škola báňská, 1992. ISBN 80-7078-132-7.
- [5] MARKO, Š. KLUCH, K. *Elektrárne I*. 1. vyd. Bratislava: Slovenská vysoká škola technická, 1989. ISBN 80-227-0148-3.

Obrázek 1. Schéma tepelné elektrárny. Dostupné z: <http://tezba-a-vyuziti-cerneho-uhli.webnode.cz/uprava-a-vyuziti-cerneho-uhli/vyuziti-cerneho-uhli/energetika/>.

Poslední aktualizace 27. 2. 2012.

Technické parametry a obrázky (2.1, 3.1, 4.2) byly převzaty z firemních materiálů a nebudou zde konkrétně citovány z důvodu přání firmy. Vstupní hodnoty parametrů jsou mírně zaokrouhleny.

## **PODĚKOVÁNÍ**

Děkuji Doc. Ing. Jiřímu Podešvovi, Ph.D., za odborné vedení bakalářské práce a mnoho cenných rad při jejím zpracování.



## **SEZNAM PŘÍLOH**

Příloha č. 1: Zkrácená tabulka výpočtu doby rozběhu jednohmotové soustavy

Příloha č. 2: Zkrácená tabulka přibližného výpočtu rozběhu mlecího kola

Příloha č. 3: Zkrácená tabulka přesného výpočtu rozběhu mlecího kola

# PŘÍLOHY

## Příloha č.1

i	t	$\omega$	n	s	n/ns	$\phi$	MH	$\varepsilon$	
-	[s]	[rad/s]	[ot/min]	-	-	[rad]	[Nm]	[rad/s <sup>2</sup> ]	
0	0	0	0	1	0	0	6156	250,2439	AB
1	0,001	0,250244	2,389653	0,998407	0,001593	0,000375	6153,597	250,1462	
...									
194	0,194	46,76362	446,5597	0,702294	0,297706	4,640085	5706,993	231,9916	
195	0,195	46,99562	448,7751	0,700817	0,299183	4,687196	5704,766	231,901	
196	0,196	47,22752	450,9896	0,69934	0,30066	4,73454	5702,539	231,8105	BC
197	0,197	47,45933	453,2032	0,697865	0,302135	4,782115	5705,287	231,9222	
198	0,198	47,69125	455,4179	0,696388	0,303612	4,829922	5706,499	231,9715	
...									
432	0,432	103,3382	986,8069	0,342129	0,657871	22,50208	5997,275	243,7917	
433	0,433	103,582	989,1349	0,340577	0,659423	22,60579	5998,549	243,8434	CD
434	0,434	103,8258	991,4634	0,339024	0,660976	22,70974	5999,823	243,8952	
435	0,435	104,0697	993,7925	0,337472	0,662528	22,81393	6026,913	244,9965	
436	0,436	104,3147	996,132	0,335912	0,664088	22,91837	6044,095	245,6949	
...									
517	0,517	126,6656	1209,567	0,193622	0,806378	32,26067	7611,536	309,412	DE
518	0,518	126,975	1212,522	0,191652	0,808348	32,3878	7633,235	310,2941	
519	0,519	127,2853	1215,485	0,189677	0,810323	32,51524	7654,995	311,1787	
520	0,52	127,5965	1218,457	0,187696	0,812304	32,64299	7736,198	314,4796	
521	0,521	127,911	1221,46	0,185693	0,814307	32,77106	7809,69	317,4671	
...									EF
555	0,555	140,5815	1342,455	0,10503	0,89497	37,33659	10770,7	437,8333	
556	0,556	141,0194	1346,636	0,102243	0,897757	37,47783	10873,02	441,9926	
557	0,557	141,4614	1350,857	0,099429	0,900571	37,61951	10976,31	446,1914	
558	0,558	141,9076	1355,117	0,096588	0,903412	37,76164	11029,51	448,354	
559	0,559	142,3559	1359,399	0,093734	0,906266	37,90422	11195,87	455,1168	EF
...									
626	0,626	157,0659	1499,869	8,73E-05	0,999913	48,20483	40,73503	1,655896	
627	0,627	157,0676	1499,885	7,68E-05	0,999923	48,3619	35,81877	1,456048	
628	0,628	157,069	1499,899	6,75E-05	0,999932	48,51897	31,49584	1,280319	
629	0,629	157,0703	1499,911	5,94E-05	0,999941	48,67604	27,69464	1,125798	

## Příloha č.2

Číslo kroku	Čas	Výstupní úhlová rychlost	Výstupní otáčky	Skluz	Naplnění	Parametr spojky	Přenášený moment spojky	Odporový moment	Výsledný moment mlecího kola	Úhlové zrychlení na výstupu
i [-]	t [-]	$\omega_v$ [rad/s]	$n_v$ [ot/min]	$s_{HS}$ [-]	naplnění <sub>(t)</sub> [%]	$\lambda$ [-]	$M_{HS}$ [Nm]	$M_o$ [Nm]	$M_{VMK}$ [Nm]	$\varepsilon_v$ [rad/s <sup>2</sup> ]
0	0,00	0	0	1,00000000	0,00000	0,00000	0,00000	0	0,000000	0,000000
1	0,01	0	0	1,00000000	0,00008	0,00025	1,13845	0	1,138454	0,000451
2	0,02	4,51230E-06	4,30893E-05	0,99999997	0,00017	0,00050	2,27691	500	-497,723092	-0,197274
3	0,03	0	0	1,00000000	0,00025	0,00075	3,41536	0	3,415362	0,001354
4	0,04	1,35369E-05	1,29268E-04	0,99999991	0,00033	0,00100	4,55382	500	-495,446184	-0,196372
5	0,05	0	0	1,00000000	0,00042	0,00125	5,69227	0	5,692270	0,002256
...										
...										
3507	35,07	62,74605	599,1806455	0,6005462	0,29225	2,79946	12748,23200	500	12248,231997	4,854630
3508	35,08	62,79460	599,6442285	0,6002372	0,29233	2,80045	12752,75530	500	12252,755296	4,856423
3509	35,09	62,84316	600,1079827	0,5999280	0,29242	2,80104	12755,42192	500	12255,421920	4,857480
3510	35,1	62,89174	600,5718379	0,5996188	0,29250	2,80027	12751,91995	500	12251,919947	4,856092
3511	35,11	62,94030	601,0355605	0,5993096	0,29258	2,79950	12748,42983	500	12248,429829	4,854709
...										
...										
11998	119,98	156,54869	1494,9299090	0,0033801	0,99983	0,11321	515,52586	500	15,525859	0,006154
11999	119,99	156,54876	1494,9304966	0,0033797	0,99992	0,11321	515,52211	500	15,522112	0,006152
12000	120	156,54882	1494,9310841	0,0033793	1	0,11321	515,51837	500	15,518366	0,006151
12001	120,01	156,54888	1494,9316715	0,0033789	1	0,11319	515,45863	500	15,458631	0,006127
12002	120,02	156,54894	1494,9322566	0,0033785	1	0,11318	515,39913	500	15,399126	0,006103

### Příloha č.3

Číslo kroku	Čas	Vstupní úhlová rychlost	Vstupní otáčky	Výstupní úhlová rychlost	Výstupní otáčky	Skluz	Naplnění	Parametr spojky	Přenášený moment spojky	Odporový moment	Hnací moment motoru	Úhlové zrychlení na vstupu	Úhlové zrychlení na výstupu
i [-]	t [-]	$\omega$ [rad/s]	n [ot/min]	$\omega_v$ [rad/s]	$n_v$ [ot/min]	$s_{HS}$ [-]	naplnění <sub>(t)</sub> [-]	$\lambda$ [-]	$M_{HS}$ [Nm]	$M_o$ [Nm]	$M_H$ [Nm]	$\varepsilon$ [rad/s <sup>2</sup> ]	$\varepsilon_v$ [rad/s <sup>2</sup> ]
0	0	157,0796	1500	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
1	0,003	157,0796	1500	0	0	1	2,727E-05	8,18E-05	0,393954545	0	0	-0,01509	0,000156
2	0,006	157,0796	1500	4,684E-07	4,4732E-06	1	5,455E-05	0,000164	0,787908637	500	0,134441	-0,02504	-0,19786
3	0,009	157,0795	1499,999	0	0	1	8,182E-05	0,000245	1,181861825	0	0,357443	-0,03159	0,000468
4	0,012	157,0794	1499,998	1,405E-06	1,342E-05	1	0,0001091	0,000327	1,575813865	500	0,638785	-0,0359	-0,19755
...													
10863	32,589	149,9062	1431,499	60,17908	574,66787	0,59856	0,29626	2,87501	12607,68214	500	12606,43	0,048119	4,798923
10864	32,592	149,9061	1431,498	60,19348	574,80535	0,59846	0,29629	2,87481	12606,79533	500	12606,47	0,012355	4,798571
10865	32,595	149,9060	1431,497	60,20787	574,94282	0,59836	0,29632	2,87462	12605,93815	500	12606,48	0,020946	4,798232
10866	32,598	149,9061	1431,498	60,22227	575,08028	0,59827	0,29635	2,87443	12605,10863	500	12606,46	0,051951	4,797903
10867	32,601	149,9063	1431,499	60,23666	575,21773	0,59817	0,29637	2,87424	12604,30492	500	12606,41	0,080815	4,797584
...													
36665	109,995	156,9056	1498,338	156,40187	1493,52786	0,00321	0,9999545	0,10753	516,61896	500	516,6231	0,000159	0,006587
36666	109,998	156,9056	1498,338	156,40189	1493,52805	0,00321	0,9999818	0,10753	516,61755	500	516,6217	0,000159	0,006586
36667	110,001	156,9056	1498,338	156,40191	1493,52824	0,00321	1	0,10753	516,61001	500	516,6203	0,000393	0,006583
36668	110,004	156,9056	1498,338	156,40193	1493,52843	0,00321	1	0,10753	516,59097	500	516,6168	0,000989	0,006576
36669	110,007	156,9056	1498,338	156,40195	1493,52862	0,00321	1	0,10752	516,57378	500	516,6080	0,001310	0,006569